

RECOMENDACIONES PARA EL DISEÑO DE CRUCES SUBFLUVIALES PARA ACUEDUCTO Y SUS OBRAS ASOCIADAS

Diego Armando Peña Sánchez

Escuela Colombiana de Ingeniería
Maestría en Ingeniería Civil
Bogotá, Colombia
2018

RECOMENDACIONES PARA EL DISEÑO DE CRUCES SUBFLUVIALES PARA ACUEDUCTO Y SUS OBRAS ASOCIADAS

Diego Armando Peña Sánchez

Tesis para optar al título:
Magíster en Ingeniería Civil, énfasis en Geotecnia

Director:
Ing. Xavier Laloum

Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito
Maestría en Ingeniería Civil
Bogotá, Colombia
2018

La tesis de maestría titulada “Recomendaciones para el diseño de cruces subfluviales para acueducto y sus obras asociadas”, presentada por Diego Armando Peña, cumple con los requisitos establecidos para optar al título de Magíster en Ingeniería Civil con énfasis en Geotecnia.

Ing. Xavier Laloum

Director de la tesis

Ing. José Vicente Amortegui

Jurado 1

Ing. Manuel García

Jurado 2

Bogotá, D.C., 28 de mayo de 2018

Agradecimientos

A todos los implicados en el desarrollo de esta tesis y de manera especial a mi tío Héctor por su constante guía y apoyo.

Resumen

Actualmente se están ejecutando en Colombia muchos proyectos nuevos en acueductos. En este sentido, el presente trabajo se preocupa por reconocer que algunas veces el trazado se ve en la obligación de cruzar un cuerpo de agua o río, lo cual hace necesaria la construcción de una línea de flujo bajo el cuerpo de agua, esto con el objeto de alterar lo menos posible el cauce y mantener protegidas las orillas. De igual manera este estudio nace de la necesidad por responder a ¿Cuál sería la mejor tecnología a utilizar? Entendiendo que la etapa de planeación de los proyectos que se encuentran en el portal de contratación evidencia una ausencia de certeza de qué tecnología se debe utilizar para los proyectos.

El desarrollo de esta investigación inicia por un intento de realización de un perfil típico de suelo en los ríos de Colombia, encontrándose una amplia variedad de formaciones geológicas que conforman el territorio nacional, lo cual imposibilita la tarea encomendada. Sigue la recopilación y análisis de las tecnologías sin zanja denominadas como: Perforación Horizontal Dirigida "HDD", Pipe Ramming, Auger Boring, Pipe Jacking y los métodos de compactación de suelo. Dicho análisis se enfoca en conocer las condiciones en las cuales son más eficientes estos métodos y sus limitaciones en cuanto a longitudes de perforación, diámetros y tipos de suelo. Un capítulo especial se dedica a los tipos de tubería aplicables.

Una vez aclarados los aspectos relativos al estado del arte, se procede a realizar un análisis extensivo de la aplicabilidad de las diferentes tecnologías en función de unos factores claves de decisión, que son el suelo, el diámetro de tubería a colocar y la longitud del cruce. Con base en dicho análisis, se elabora un manual de selección de tecnología sin zanja para cruces subfluviales, el cual se pone en práctica en un ejemplo real de ingeniería.

Palabras Claves

Acueducto, cruces subfluviales, tecnologías sin zanja, suelos, manual de selección.

Abstract

Currently many new water supply projects are being executed in Colombia. In this sense, the present work is concerned to recognize that sometimes the layout is in the obligation to cross a body of water or river, which requires the construction of a line under the water body, this with the object to alter the channel as little as possible and keep the banks protected. In the same way, this study is born of the need to respond to the question: what would be the best technology to use? Understanding that the stage of planning of the projects that are in the public procurement portal shows an absence of certainty of what technology should be used for the projects.

The development of this research begins with an attempt to realize a typical profile of soil in the rivers of Colombia, finding a wide variety of geological formations that make up the national territory, which makes the entrusted task impossible. The following step consists in the collection and analysis of trenchless technologies named as: Horizontal Directional Drilling "HDD", Pipe Ramming, Auger Boring, Pipe Jacking and soil compaction methods. This analysis focuses on knowing the conditions under which these methods are most efficient and their limitations in terms of drilling lengths, diameters and soil types. A special chapter is devoted to the applicable types of pipe.

Once the aspects relating to the state of the art have been clarified, an extensive analysis of the applicability of the different technologies is carried out based on key decision factors, which are the soil, the diameter of the pipe to be laid and the length of the crossing. Based on this analysis, a selection manual for the use of trenchless technology for subfluvial crossings is prepared and is put into practice in a real engineering example.

Keywords

Water supply, subfluvial crossings, trenchless technologies, soils, selection manual.

TABLA DE CONTENIDO

pág.

Índice de tablas

Índice de figuras

Índice de Anexos

Resumen	5
Abstract.....	6
Introducción.....	1
Alcance del trabajo de grado.....	2
Generalidades sobre tecnologías sin zanja.....	4
Antecedentes.....	4
Antecedentes en Colombia.....	7
Capítulo 1 Obtención de un perfil típico de suelo	9
1.1 Recopilación de perfiles de suelo.....	9
1.2 Análisis de perfiles de suelo.....	13
1.3 Análisis del comportamiento del fondo de los ríos.....	16
Capítulo 2 Tipos de tecnologías sin zanja para obra nueva	20
2.1 Perforación Horizontal Dirigida.....	20
2.1.1 Procedimiento constructivo.....	21
2.1.2. Tipos de perforación horizontal dirigida.....	23
2.1.3. Equipos.....	26
2.1.4. Aplicabilidad de la metodología.....	27
2.1.5. Ventajas y desventajas de la metodología.....	29
2.2 Métodos de compactación de suelo.....	29
2.2.1. Procedimiento constructivo.....	29
2.2.2. Tipos de método de compactación de suelo.....	30
2.2.3. Equipos.....	32
2.2.4. Aplicabilidad.....	33
2.2.5. Ventajas y desventajas.....	34

2.3 Perforación e hincas de tubería por golpeo (Pipe Ramming).....	34
2.3.1. Procedimiento constructivo	35
2.3.2. Tipos de métodos de Pipe Ramming	36
2.3.3. Equipos.....	36
2.3.4. Aplicabilidad.....	36
2.3.5. Ventajas y desventajas	36
2.4 Perforación horizontal con tornillo sin fin (Auger Boring)	37
2.4.1. Procedimiento constructivo	37
2.4.2. Tipos de métodos de Auger Boring	38
2.4.3. Equipos.....	40
2.4.4. Aplicabilidad.....	40
2.4.5. Ventajas y desventajas	41
2.5 Pipe Jacking.....	41
2.5.1. Procedimiento constructivo	42
2.5.2. Tipos de Pipe Jacking	43
2.5.3. Equipos.....	46
2.5.4. Aplicabilidad.....	46
2.5.5. Ventajas y desventajas	47
Capítulo 3 Tipos de tubería para tecnologías sin zanja	48
3.1 Tubería GRP poliéster reforzado con fibra de vidrio	48
3.2 Tubería en acero	49
3.3 Tubería PEAD	50
3.4 Tubería en concreto reforzado	51
Capítulo 4 Elaboración de metodología de análisis de aplicabilidad de las tecnologías sin zanja.....	55
4.1 Factores generales para cada metodología.....	55
4.1.1 Condiciones de terreno	55
4.1.2 Longitud del cruce.....	55
4.1.3 Condiciones finales de la tubería instalada	56
4.1.4 Proximidad a otras instalaciones.....	56
4.1.5 Diámetro de la perforación.....	56
4.1.6 Potenciales movimientos de los suelos.....	56

4.1.7	Espacio de trabajo necesario.....	56
4.1.8	Tolerancias (alineación e inclinación)	57
4.1.9	Limitaciones en tiempos de ejecución	57
4.1.10	Tipo de tubería	57
4.1.11	Costos y riesgos	57
4.2	Escogencia de factores	57
4.2.1	Condiciones de terreno	58
4.2.2	Diámetro de la perforación	58
4.2.3	Longitud de la perforación.....	58
4.3	Construcción de tablas de aplicabilidad.....	59
4.4	Construcción de gráficas de aplicabilidad.....	63
4.5	Construcción de las gráficas para los cruces subfluviales	65
4.5.1	Evaluación de los diámetros.	66
4.5.2	Evaluación de los anchos de los ríos.	66
4.5.3	Adaptación de gráficas de metodología	68
4.6	Análisis de otras variables de decisión	71
4.6.1	Efecto en el suelo circundante	71
4.6.2	Características del pozo de ataque.....	72
Capítulo 5 Manual de selección de tecnología sin zanja para cruces subfluviales ..		75
Capítulo 6 Aplicación de la metodología		78
6.1	Definición de un caso práctico de aplicación de la metodología	78
6.1.1	Problemática del caso de estudio	78
6.1.2	Información de suelos	78
6.1.3	Longitud del cruce subfluvial	83
6.1.4	Diámetro de la conducción.....	84
6.2	Aplicación del manual al caso practico	84
CONCLUSIONES.....		86
BIBLIOGRAFÍA.....		87

Índice de Tablas

	pág.
Tabla 1 Alcance de las actividades realizadas	3
Tabla 2 Resumen perfil número 2 (muelle refinería Barrancabermeja)	11
Tabla 3 Resumen perfil número 3 (acueducto alterno, municipio de Puerto Boyacá)	12
Tabla 4. Velocidades a la cuales se produce erosión.	18
Tabla 5 Diferentes procedimientos de navegación de PHD	25
Tabla 6 Clasificación de máquinas perforadoras PHD	26
Tabla 7 Aplicabilidad de PHD según el tipo de material.....	28
Tabla 8 Resumen ventajas y desventajas PHD.....	29
Tabla 9 Aplicabilidad métodos de compactación de suelo	33
Tabla 10 Resumen ventajas y desventajas métodos de compactación.....	34
Tabla 11 Resumen ventajas y desventajas Pipe Ramming	36
Tabla 12 Resumen ventajas y desventajas Auger Boring	41
Tabla 13 Aplicabilidad del Pipe Jacking	47
Tabla 14 Resumen ventajas y desventajas de la microtunelería Pipe Jacking	47
Tabla 15 Estructura de las tablas de condiciones.....	59
Tabla 16 Aplicabilidad de las metodologías en base al diámetro de la perforación	60
Tabla 17 Aplicabilidad de las metodologías en base a la longitud de la perforación.....	61
Tabla 18 Aplicabilidad de las metodologías en base al tipo de suelo	62
Tabla 19 Ciudades más pobladas de Colombia	66
Tabla 20 Resumen anchos, ríos de Colombia	67
Tabla 21 Orden de elegibilidad según el efecto en el suelo circundante	72
Tabla 22 Orden de elegibilidad según el espacio de trabajo necesario	74
Tabla 23 Perfil de suelo No. 1 (acueducto alterno municipio de Puerto Boyacá).....	80
Tabla 24 Perfil de suelo No. 2 (acueducto alterno municipio de Puerto Boyacá).....	81
Tabla 25 Perfil de suelo No. 3 (acueducto alterno municipio de Puerto Boyacá).....	81
Tabla 26 Perfil de suelo No. 4 (acueducto alterno municipio de Puerto Boyacá).....	82
Tabla 27 Perfil de suelo No. 5 (acueducto alterno municipio de Puerto Boyacá).....	82
Tabla 28 Perfil de suelo No. 6 (acueducto alterno municipio de Puerto Boyacá).....	83
Tabla 29 Estimación del porcentaje de gravas según perforación	84

Índice de Figuras

	pág.
Figura 1 Prototipo de máquina de perforación horizontal (Da Vinci 1495)	4
Figura 2 Tecnologías sin zanja para instalación de tubería en obra nueva	8
Figura 3 Ubicación estudios de suelos en el rio Magdalena	9
Figura 4 Resumen perfil número 1 (malecón ciudad de Barranquilla).....	10
Figura 5 Resumen perfil número 4 (estudio geomorfológico, Neiva Hulia).....	13
Figura 6 Distribución de velocidades en un rio.....	17
Figura 7 Proceso de ejecución de la perforación piloto	21
Figura 8 Proceso de ejecución del ensanchamiento de la perforación piloto	22
Figura 9 Tipos de expansores	22
Figura 10 Varillaje para perforación horizontal dirigida.....	23
Figura 11 Cabezas de perforación horizontal dirigida Mini-HDD.....	24
Figura 12 Brocas de perforación PHD	25
Figura 13 Puntas de compactación.....	30
Figura 14 Martillo de impacto	31
Figura 15 Esquema de funcionamiento del martillo de impacto.....	31
Figura 16 Proceso de ejecución del método de perforación percusiva por impacto	32
Figura 17 Esquema pipe ramming	35
Figura 18 Sistema de camisa de acero con tornillo sinfín en su interior (Auger Boring)	38
Figura 19 Esquema de perforación (Auger Boring)	39
Figura 20 Esquema técnica Auger Boring Cradle Type.....	40
Figura 21 Tuneladoras	42
Figura 22 Procedimiento Pipe Jacking.....	43
Figura 23 Microtuneladora de presión de tierras EPB	44
Figura 24 Microtuneladora de presión de lodos (AVN).....	45
Figura 25 Composición de las paredes de la tubería GRP	49
Figura 26 Proceso fabricación de tubería PEAD	50
Figura 27 Equipo de prensa vibrocompactadora	52
Figura 28 Llenado de prensa vibrocompactadora	52
Figura 29 Compactación de prensa vibrocompactadora	53
Figura 30 Retiro de la tubería de prensa vibrocompactadora	53
Figura 31 Equipo de compresión radial.....	54
Figura 32 Gráfica base para la metodología	63
Figura 33 Gráfica aplicabilidad de Pipe Jacking en roca dura	64
Figura 34 Gráfica aplicabilidad de tecnologías sin zanja en roca dura.....	64
Figura 35 Ejemplo aplicabilidad de la metodología	65
Figura 36 Ejemplo de medida en Rio Sinú	67
Figura 37 Gráfica final aplicabilidad de tecnologías sin zanja en rocas	68
Figura 38 Gráfica final aplicabilidad de tecnologías sin zanja en grava Ramming	69
Figura 39 Gráfica final aplicabilidad de tecnologías sin zanja en arena gravosa.....	69
Figura 40 Gráfica final aplicabilidad de tecnologías sin zanja en arena poco gravosa	70
Figura 41 Gráfica final aplicabilidad de tecnologías sin zanja en arcilla	70
Figura 42 Gráfica final aplicabilidad de tecnologías sin zanja en HDD	71
Figura 43 Pozo de ataque de una hinca de tubería.....	73
Figura 44 Pozo de ataque Auger boring	74

Figura 45 Fuerzas que afectan la flotación	76
Figura 46 Ubicación de las perforaciones realizadas	80
Figura 47 Planta del cruce subfluvial proyecto acueducto alterno puerto Boyacá	83
Figura 48 Obtención de la metodología	85
Figura 49 Obtención del tamaño del equipo.....	85

Índice de Anexos

Anexo 1. Tablas de aplicabilidad de tecnologías sin zanja

Introducción

En la actualidad, Colombia es un país que cuenta con una gran riqueza hídrica. Sin embargo, durante el periodo 2010-2015, la proporción de personas que podían acceder a suministros de agua potable aumentó, lo que se tradujo en que 91,4 de cada 100 personas tuvieran acceso, cuando en el 2000 solo 88,4 (de 100) lo tenían. Esto permitió mejorar las condiciones de ciudadanos que debían caminar durante largas jornadas para obtener el recurso o que tenían acceso a fuentes de agua contaminadas, y lo más preocupante es que en los próximos años la demanda de agua potable seguirá aumentando. (Findeter 2017)

Generalmente el trazado se ve en la obligación de cruzar un cuerpo de agua o río, lo cual hace necesaria la construcción de una línea de flujo bajo el cuerpo de agua, con el objeto de alterar lo menos posible el cauce y mantener protegidas las orillas y sus barreras vegetales.

Por otra parte, se ha realizado el seguimiento a algunos de los proyectos publicados en el portal de contratación, y se observó que existe poca información en cuanto al plan de investigación del suelo y a sus resultados, con ensayos que no arrojaban resultados específicos para el tipo de obra que se iba a ejecutar: en ninguno de estos se encuentran recomendaciones tales como ¿Cuál sería el mejor método constructivo a utilizar? ¿Cuál debe ser la metodología de diseño? Esto sin duda generará problemas en los tiempos de ejecución, así como sobrecostos al proyecto.

Con base en lo anterior, se generó este trabajo de investigación, el cual consiste en desarrollar una metodología que indique los factores de decisión a tener en cuenta para realizar un cruce subfluvial, qué tipo de técnicas constructivas y de revestimiento existen y cuál es el método más favorable según un perfil típico de suelo.

Alcance del trabajo de grado

El desarrollo de esta investigación inició con una recopilación de perfiles de suelo típicos para los ríos de Colombia, para esto se recopilaban estudios de suelos sobre el río Magdalena, para posteriormente evaluar otros ríos.

El desarrollo de esta investigación inició por la recopilación y análisis de las tecnologías sin zanja, tales como la Perforación Horizontal Dirigida "HDD", el Pipera jacking, el Ramming y el auger boring, se analizará cómo funcionan en cada tipo de suelo, así como los problemas que pueda presentar cada tecnología; Posteriormente, se procedió a realizar un plan de investigación para poder obtener los parámetros necesarios para el diseño.

Dicho análisis se orientó en la búsqueda de las condiciones en las cuales son más eficientes estos métodos divinando sus limitaciones.

Una vez reconocidas y validadas las fortalezas y debilidades de cada técnica, los perfiles de suelo típicos y el plan de investigación de suelo, se procedió a desarrollar una metodología, la cual, de acuerdo con los resultados obtenidos del plan de investigación de suelo y a las condiciones específicas de cada proyecto (Ubicación, diámetro de la tubería, longitud del cruce, entre otros) permite escoger el método constructivo más indicado.

Toda la información antes recopilada y analizada, se plasmó en un manual de aplicación paso a paso, el cual será requerido al momento de diseñar un cruce subfluvial.

Por último, se implementará la metodología en un caso práctico

Las actividades realizadas fueron las siguientes:

Tabla 1 Alcance de las actividades realizadas

ACTIVIDAD	ALCANCE DE LA ACTIVIDAD
Investigación Bibliográfica	Investigar y recopilar la información correspondiente a las diferentes tecnologías sin zanja. Esta investigación debe arrojar datos tales como: metodología de diseño, método constructivo, ventajas, limitaciones, tiempos de ejecución y rendimientos, costos, disponibilidad.
	Investigar y recopilar la información correspondiente a estudios de suelos realizados en zonas de riveras de ríos en Colombia, con el fin de establecer perfiles típicos de ríos en diferentes zonas del país.
Análisis	Tabular y analizar datos en las diferentes tecnologías, con el fin de consolidar la información y encontrar las características particulares de cada una ya que pueden convertirse en una consideración especial al momento de realizar el diseño.
	Consolidar la información de los perfiles típicos de ríos, con el fin de encontrar las características que podrían convertirse en una consideración especial al momento de realizar el diseño.
	Una vez definidas las consideraciones especiales de cada tecnología y cómo puede variar con respecto de los perfiles típicos de los ríos, determinar un plan de investigación de suelo, el cual definirá los ensayos pertinentes a realizar para obtener los parámetros necesarios a la hora de realizar el diseño.
	Realizar un manual de aplicación y análisis, que se emplee al momento de diseñar un cruce subfluvial.

Fuente. El autor

Generalidades sobre tecnologías sin zanja

Las tecnologías sin zanja son un conjunto de metodologías para la instalación de infraestructura subterránea que prescinden de la realización de excavaciones en la longitud del trayecto, evitando así mayores afectaciones en superficie ya que requieren una excavación mínima en el acceso y la salida de la tubería.

Dentro de la aplicación de las tecnologías sin zanja se encuentra la construcción de cruces subfluviales, los cuales son obras que constan de la construcción de líneas de flujo bajo los cauces de agua. Dichas tecnologías son de gran utilidad que permiten mantener inalterado tanto el cauce como las barreras vegetales en ambas orillas.

Antecedentes

Aunque la idea de las tecnologías sin zanja no es nueva (Da Vinci ya tenía un prototipo en 1495), el desarrollo de la tecnología sin zanja tuvo sus inicios en los años 60 en Japón, como resultado de una decisión del gobierno de incrementar la proporción de población urbana provista con los servicios básicos. De igual forma en Europa Occidental y Norte América no fue difícil encontrar datos sobre el inicio de instalación de tuberías sin zanja que datan sus inicios para esta misma época (Viana Vidal, 2004).

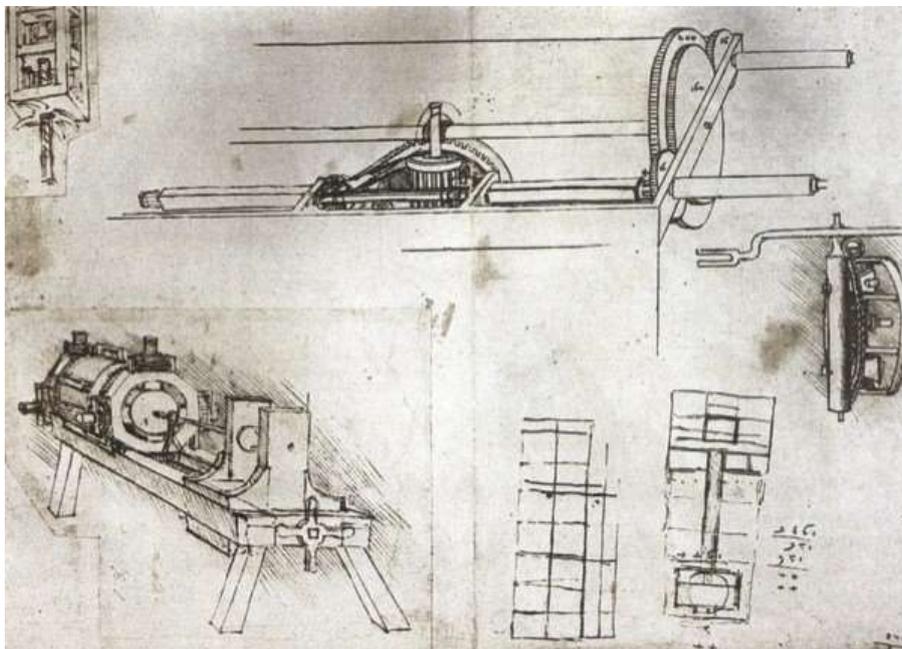


Figura 1 Prototipo de máquina de perforación horizontal (Da Vinci 1495)

Fuente. <http://victoryepes.blogs.upv.es/tag/trenchless/>

En el año 1963, el Ministerio japonés resolvió, por medio de una serie de programas desarrollados durante 5 años, generar un aumento en la proporción de la población con servicios en un 46% para el año de 1990. Es así como Osaka es referida constantemente como la ciudad en la que nace el micro-túnel, con sus estrechas calles densamente congestionadas donde de la conurbación se generó severas restricciones a la excavación de la superficie. Dichas zanjas comúnmente deben ser cubiertas en el día y descubiertas en la noche para trabajar en la ciudad; por lo tanto los constructores no tenían derecho de abrir las calles (Zanja) por lo cual los métodos a zanja abierta no solo se convirtieron en prohibidos sino imposibles (Pinzón Abaunza, 2010).

Bajo estas circunstancias y con un mercado que estaba garantizado para los proyectos con zanja, se empezaron a dar varios incentivos para el desarrollo de nuevos métodos de construcción. Por lo anterior y con la ayuda del gobierno japonés, los usuarios, manufacturas, contratistas y universidades crearon una nueva mini industria, la cual se basaba en el pipe-jacking (Lobo, 1997).

Los nuevos proyectos fueron diseñados específicamente con una visión de palanquear tubos desde pozos maestros en posiciones que luego funcionan como boca de alcantarilla. Todas las operaciones eran realizadas por medio de control remoto sin personas trabajando en la trayectoria. Estas son características de lo que hoy se conoce como las tecnologías sin zanja (Pinzón Abaunza, 2010).

Mientras tanto, en 1980 el Ministerio de Desarrollo y Tecnología de Alemania occidental patrocinó un proyecto de micro-túnel en Hamburgo, el cual fue propuesto por un equipo Japonés – Alemán. A mediados de los años 80, la metodología de micro-túnel era ampliamente utilizada para la instalación de tubería, particularmente en las ciudades de Tokio y Osaka donde las condiciones del suelo eran favorables. En 1985 en Europa solo existían 15 micro-tuneladoras, todas ellas en la llanura de Alemania del Norte, donde el estrato uniforme de arcilla favorece la técnica (Pinzón Abaunza, 2010).

Estas máquinas, nuevas en su época, eran todas usadas con brocas de berbiquí para remover la tubería dañada a través de la nueva línea de tubería instalada, el uso de micro-túneles ha sido utilizado para la instalación de servicios en países como Singapur, Australia, Hong-Kong y Medio Oriente, por necesidad de reemplazar tuberías de asbesto-cemento las cuales estaban generando severos problemas de corrosión por el sulfuro de hidrógeno (Pinzón Abaunza, 2010).

En los años noventa con el aumento de la población y el desarrollo de la industria turística, no era políticamente aceptable la interrupción del tráfico en la superficie. El ímpetu por desarrollar los métodos sin zanjas en Norte América fue diferente a los impulsos en Japón.

El crecimiento de las industrias de petróleo, el gas y sus necesidades de largas líneas de tubería cruzando territorios ambientalmente sensibles, estimularon el uso de la perforación direccional. La necesidad inicial entonces fue la de hacer proyectos piloto como superar ríos, carreteras y vías de tren. Con una evidente reducción en el impacto al medio ambiente y la reducción de tiempos de construcción a los acostumbrados (Viana Vidal, 2004).

Las generaciones venideras o incluso la actual, reconocerán a las tecnologías sin zanja como uno de los desarrollos más significativos dentro de la industria de la construcción así mismo, con el paso del tiempo las zanjas se hicieron aún más profundas y sofisticadas, con longitudes mayores teniendo en cuenta los servicios requeridos a ser instalados bajo tierra, cambiando de esta forma la idea inicial que se tenía de las zanjas, pues eran vistas como un beneficio para la colocación de servicios en caminos sin pavimentar, pero luego esta empezó a ser tomada como la principal causa de la destrucción de la superficie en caminos con tráfico moderado o alto (Asociación Ibérica de tecnologías Sin Zanja, 2013).

La tecnología sin zanja es una gran herramienta, pero no debería dejarse solo a este nivel, pues al obtener el máximo rendimiento de estas tecnologías se observará un cambio radical para el cliente, diseñador, constructor, y para los habitantes en general de los sectores donde son usados estos métodos, quienes dejarían de sufrir las graves molestias asociadas a los trabajos con zanja abierta en las vías (Asociación Ibérica de tecnologías Sin Zanja, 2013).

En la actualidad, la tecnología sin zanja es el método más utilizado a nivel mundial para la construcción de redes de servicios públicos. Adicionalmente, en la última década se han desarrollado nuevos equipos y nuevas tecnologías, las cuales permiten salvar mayores distancias, con tuberías de mayor diámetro y mejores rendimientos. Desafortunadamente la contratación estatal no ha estado a la vanguardia de estas nuevas tecnologías, lo que ha ocasionado que en la actualidad no se encuentre una normativa clara al respecto de este tipo de obras.

Antecedentes en Colombia

Los primeros antecedentes sobre este tipo de tecnología en nuestro país datan de los años 80, gracias a la Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá con un megaproyecto llamado Bogotá IV. este proyecto se desarrolló sobre el sector de la calle 116 con carrera Séptima, basándose en las metodologías previamente estudiadas en la construcción sin zanja, llegando a instalar redes de tubería con diámetros superiores a un metro y longitudes lineales entre los 30 y 50 metros (Lobo, 1997).

Para principios de la década de los 90 debido al interés de algunas empresas petroleras como Ecopetrol, (quienes trabajan en el transporte de hidrocarburos) se activó en mayor cantidad aplicaciones de tecnologías sin zanja para instalación de tuberías en obras como los cruces de oleoductos bajo diferentes ríos como el Magdalena, Cauca, Saldaña, entre otros, presentando grandes ventajas, en condiciones ambientales, sociales y económicas en comparación con los métodos tradicionales. Lo anterior se dio porque con estos métodos no había necesidad de desviar el río para realizar las excavaciones, logrando así márgenes de seguridad más adecuados contra los posibles movimientos de tierra en las laderas de los ríos, evitando problemas por socavación debido a que la tubería se instala a grandes profundidades (Lobo, 1997).

Con el crecimiento en la instalación de tuberías de gas natural, se empezó a trabajar con la técnica de perforación horizontal neumática y dirigida, principalmente con maquinaria importada de Estados Unidos entre los años de 1993 y 1995 (Lobo, 1997).

En la actualidad los métodos de tecnologías sin zanja se pueden clasificar según su utilización y se dividen básicamente en:

- Obra nueva
- Sustitución de tuberías
- Rehabilitación de tuberías

Para el presente documento solo se trabajará con las tecnologías de obra nueva, es decir todos los procesos empleados para instalar una tubería a lo largo de un nuevo trazado. Ver **Figura 2** Tecnologías sin zanja para instalación de tubería en obra nueva



Figura 2 Tecnologías sin zanja para instalación de tubería en obra nueva
Fuente. El autor

Capítulo 1 Obtención de un perfil típico de suelo

Se inicia por recolectar varios perfiles estratigráficos del río Magdalena, los cuales se consolidan con el fin de poder encontrar patrones típicos (espesores, tipos de material), posteriormente se realizará el mismo ejercicio con los demás ríos principales de Colombia.

1.1 Recopilación de perfiles de suelo

Se inicia con el análisis de 4 diferentes perfiles los cuales corresponden a estudios de suelos realizados a las orillas del río Magdalena, En la **Figura 3** Ubicación estudios de suelos en el río Magdalena se presentan sus ubicaciones.



Figura 3 Ubicación estudios de suelos en el río Magdalena

Fuente. El autor

Los perfiles encontrados en dichas perforaciones se presentan a continuación:

El primer estudio de suelos recopilado corresponde al río Magdalena a la altura de la ciudad de Barranquilla a orillas del mismo, en este estudio realizaron en total 8 sondeos.

El perfil geotécnico de uno de los sondeos se presenta en la **Figura 4**.

INEICA		REGISTRO DE PERFORACIÓN				Sondeo:	Hoja:
						S1	2 de 3
Proyecto:	Unidad Funcional 4				Perforador:	Darwin Feria	
Cliente:	EDUBAR				Equipo de perf.:	Roto Percutor Rolabec	
Coordenadas N:	10°59'56.99"	E:	74°46'23.90"	Tipo de martillo:	Estandar		
Localización:	Avenida del Río Via 40				Elevación de la superficie:	-	
N.A.P.:	Fecha inicio:	19/01/2017		Fecha fin:	31/01/2017		
Profundidad (m)	Elevación (m)	Gráfico	Revestimiento	Muestra de suelo	Golpes		DESCRIPCIÓN DEL MATERIAL
				Tipo	Numero	Clasificación USCS	
							ROD %
10.00				HQ		CL	
10.50				S	8		
11.00							44.20%
11.50						SM	
12.00				S	9		
12.50							29.51%
13.00				HQ			
13.50				S	10	SP-SM	
14.00							27.13%
14.50				HQ			
15.00				S	11		
15.50							23.46%
16.00				HQ		SP	
16.50				S	12		
17.00							26.90%
17.50				HQ		SM	
18.00				S	13		
18.50							14.38%
19.00				HQ			
19.50				R	14	504"	
20.00				HQ	15		
				R	16	SM-SC	
							4.44%
							9.38%

TIPO DE MUESTRA: U = Shelby, S = SPT, C = Caja, HQ, NQ, BQ = Barreras
 REVESTIMIENTOS: HW, NW, BW

Figura 4 Resumen perfil número 1 (malecón ciudad de Barranquilla)
Fuente. Geotécnica avenida del río y Malecón, Ineica 2015.

El segundo estudio de suelos recopilado corresponde al río Magdalena a la altura del municipio de Barrancabermeja a orillas del mismo. En este estudio realizaron en total 12 sondeos hasta los 30 m de profundidad.

El resumen del perfil geotécnico de los 12 sondeos se presenta en la **Tabla 2** Resumen perfil número 2 (muelle refinería Barrancabermeja)

Tabla 2 Resumen perfil número 2 (muelle refinería Barrancabermeja)

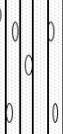
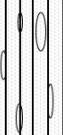
Profundidad Mts		Suelo	Limitaciones geotécnicas
Desde	Hasta		
0.0	Variable de 5.0 a 12.5	Rellenos compuestos por arenas limosas, muy húmedas a saturadas, poco resistentes, color marrón, gris, beige y amarillo.	Suelo muy suelto y de alta permeabilidad, susceptible a deformaciones y saturación.
9.0	11.0	Suelos aluviales compuestos por gravas arcillosas, permeables, duras, saturadas, resistentes, color gris y verde.	Suelos susceptibles a la socavación y bajo condiciones de saturación fluyen fácilmente.
Variable de 11.0 a 12.5	Variable de 15.5 a 16.5	Suelos residuales compuestos por arcillas limosas y limos arenosos, poco permeables, muy duros, saturados, resistentes, color marrón, verde y gris.	Suelos residuales de la formación real.
Variable de 15.5 a 16.5	Profundidades no determinadas mayor a 30.0	Suelos residuales compuestos por arenas arcillosas, algo permeables, muy duras, saturadas, resistentes, con gravas y algunos bloques muy duros color marrón, verde y gris.	Suelos residuales de la formación real.

Fuente. Diagnóstico de estabilidad de la estructura de contención del muelle sur de la refinería de Barrancabermeja. (Suarez, 2012)

El tercer estudio de suelos recopilado corresponde al río Magdalena a la altura del municipio de puerto Boyacá a orillas del río Magdalena, en este estudio realizaron en total 6 sondeos.

El perfil geotécnico de uno de los sondeos se presenta en la **Tabla 3** Resumen perfil número 3 (acueducto alternativo, municipio de Puerto Boyacá)

Tabla 3 Resumen perfil número 3 (acueducto alterno, municipio de Puerto Boyacá)

PERFIL DE SUELO No 3													
PROF. m	SIMBOLO	DESCRIPCION DEL MATERIAL	wn. %	LIMITES ATTERBERG			GRADACION			γ_t g/cc	RESISTENCIA kg/cm ²		
				L.L. %	L.P. %	I.P. %	GRAVAS %	ARENAS %	FINOS %		R.P.I.	qu	N
0.00		ARENA GRUESA CON MH Y GRAVAS PEQUEÑAS											
3.50			43.0	84.4	81.6	2.8	24.2%	30.1%	45.7%	2.033	1.25	1.90	16
11.00		PEQUEÑOS FRAGMENTOS DE ARCILLONITAS LIMO ARCILLOSO CARMELITA DE HUMEDAD MODERADA Y PLASTICIDAD ALTA CONSISTENCIA FIRME	38.5							2.105	-	-	25
			34.7	70.1	38.0	32.0	0.0%	2.1%	97.9%	2.122	2.50	2.64	33
14.00		RECHAZO GRAVAS Y PIEDRAS BIEN GRADAS(RECHAZO)	26.5							2.085	3.25	-	65
				25.8	73.4	70.6	2.8	30.2%	24.6%	45.1%	3.021	>4.0	-
25.00		CONTINUA EL MISMO MATERIAL SE TORNA AMARILLO CON VETAS GRISES CONSISTENCIA MUY FIRME PEÑA AMARILLA	23.3							4.032	-	R	95

Fuente. Estudio geomorfológico, geotécnico y de dinámica fluvial río Magdalena. Cajigas 2015.

El cuarto estudio de suelos recopilado corresponde al río Magdalena a la altura de la ciudad de Neiva, en este estudio realizaron en total 8 sondeos.

El perfil geotécnico de uno de los sondeos se presenta en la **Figura 5**.

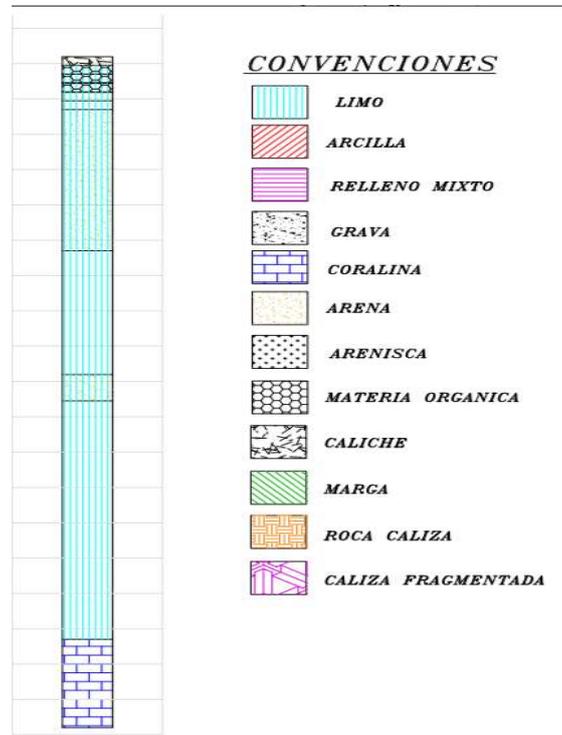


Figura 5 Resumen perfil número 4 (estudio geomorfológico, Neiva Hulia)
 Fuente. Estudio geomorfológico, geotécnico y de dinámica fluvial río Magdalena. Cajigas 2015.

1.2 Análisis de perfiles de suelo

De acuerdo con la información recopilada, se puede observar que existe una gran variación entre los tipos de materiales encontrados en cada zona, sin tener en cuenta la variación presente en la gradación de los distintos materiales.

¿Por qué se da esta variabilidad? La variedad de características geológicas, geomorfológicas, climáticas y de vegetación de las cuencas de los ríos, hacen que los suelos sean muy variados. Los suelos se originan en procesos en los que interactúan las particularidades de las rocas meteorizadas, el agua y otros factores climáticos. Sus propiedades, como su composición mineralógica y contenidos orgánicos, dependen directamente de las rocas a partir de las cuales se forman y de la capa vegetal que los recubre. Las rocas, afectadas por el agua y las condiciones climáticas, se desintegran, y su material forma los suelos en el mismo lugar o si es transportado, lo hace en sectores más bajos.

El transporte de este material depende de la densidad de la red hídrica y de la geomorfología, más específicamente, de la pendiente del terreno. En las cuencas de los ríos de Colombia estos procesos son relativamente recientes, dado que es un territorio joven. Además, en las partes medias y bajas predomina una alta actividad morfodinámica la cual está constantemente renovando los suelos. La actividad tectónica, que implica fallas, sismicidad y vulcanismo, produce inestabilidad en los terrenos y provoca movimientos de masas, algunos de los cuales, de considerable magnitud, tienen lugar en unos períodos muy cortos, como los ocurridos en Armero (1985), Villatina (1987), río Páez (1996) y río de oro (2005). Los suelos más susceptibles a movimientos en masa (deslizamientos) se encuentran en pendientes pronunciadas y sobre rocas más fracturadas, que pueden o no tener cobertura vegetal.

En los suelos, al igual que los sistemas geomorfológicos, están determinados por la altura. Así, los suelos de montaña alta, debido al excedente hídrico y a la baja temperatura, están formados básicamente por descomposición vegetal. Más abajo, en el piso templado húmedo, aumenta en proporción la alteración de las rocas, y los suelos cuentan con una capa de humus menos gruesa. En los climas cálidos, los procesos de meteorización se dan con mayor intensidad y son más profundos, y la alta sedimentación y los depósitos aluviales, que están en constante movimiento, renuevan continuamente los suelos. Por lo tanto, en el valle del Magdalena abundan suelos recientes que se sobre imponen a otros poco evolucionados. Por último, los valles aluviales del Magdalena y del Cauca, así como las planicies del Magdalena, reciben como material erosivo todos los suelos transportados de la cuenca.

Con el fin de ilustrar la dificultad de obtener una clasificación general para los ríos, se realizó una recopilación de la variabilidad de los suelos a través de diferentes tramos del río Magdalena, comenzando desde el piedemonte de Huila, los cuales comprenden varias formaciones geológicas que incluyen rocas sedimentarias de la era del cretáceo, rellenos aluviales y fluviovolcanicos en todo el valle del Magdalena, a la altura del cañón se encuentran las rocas más antiguas que corresponden a rocas meta-sedimentarias del paleozoico y sobre el margen derecho también se pueden encontrar rocas sedimentarias de tipo caliza.

La zona de terrazas del Magdalena está conformada por la cuenca de clima cálido seco, donde impera la sequía durante gran parte del año. Son suelos producto de materiales aluviales enriquecidos con sedimentos de las vertientes de las cordilleras Central y Oriental localizados principalmente en los departamentos del Huila y Tolima, son suelos que manifiestan influencia de materiales volcánicos. Surgen a partir de la meteorización de los depósitos de cenizas volcánicas que se encuentran en gran parte de los territorios cordilleranos, con excepción de las zonas de

pendiente pronunciada. En el valle del río Magdalena son comunes los suelos originados en flujos de material volcánico. (Atlas cuenca del río Magdalena)

Las emisiones volcánicas del Nevado del Tolima han dado origen a flujos piroclásticos y lahares que se han canalizado por los diferentes drenajes, dando origen así a abanicos fluviovolcánicos los cuales se han depositado sobre las llanuras del río Magdalena y a lo largo de los mismos, alcanzando espesores variables. Dentro de éstos se suelen encontrar Tobas, aglomerados, depósitos pumíticos y niveles arenosos. Se caracterizan por un contenido de bloques angulares de tamaño variable en matriz limo-arenosa, con inclusión de gravas pumíticas y andesíticas, con menor proporción de clastos metamórficos. (Atlas cuenca del río Magdalena)

Más al norte de los abanicos del Tolima, entre los municipios de Girardot y Puerto Salgar, se encuentran en un clima cálido seco, con déficit de agua, altamente erosionados, los suelos del Magdalena medio seco. Cuando están en zonas cercanas al río son de carácter hidromórfico, así llamados porque, dadas las condiciones de movimiento que el agua impone sobre ellos, en lugar de madurar son renovados continuamente. Pertenecen a zonas donde las condiciones morfológicas del paisaje son moldeadas continuamente. Estos suelos se presentan a lo largo de toda la planicie inundable del río Magdalena. (Atlas cuenca del río Magdalena)

Otro tipo de suelo corresponde a los suelos que se forman preferentemente en las laderas de pendiente marcada, donde las cenizas volcánicas, por efecto de la traslación, no se han depositado, y en sitios alejados de las zonas volcánicas donde la pendiente es moderada. Esencialmente son suelos de composición ígneo-metamórfica o sedimentaria y abundan en los macizos de Garzón, Quetame y Santander, en la cordillera Oriental, y en la Sierra Nevada de Santa Marta. Generalmente coinciden con zonas de alta susceptibilidad a fenómenos de remoción en masa, debido a las condiciones de humedad, en climas fríos a templados. (Atlas cuenca del río Magdalena)

Por otra parte, están los suelos sobre arcillolitas en clima seco, que se encuentran sobre todo en climas cálidos secos, como en la cuenca baja del río Magdalena, y se forman a partir de la sedimentación de materiales transportados. También se los encuentra en áreas muy secas, donde la precipitación está por debajo de los 500 mm al año, condición que genera desertización en las zonas no inundables. (Atlas cuenca del río Magdalena)

Siguiendo en dirección Norte se encuentran los suelos del Magdalena medio húmedo, influidos por la humedad del Pacífico y caracterizados por su fertilidad baja.

Están distribuidos en los departamentos de Antioquia los cuales provienen de rocas ígneas intrusivas del batolito Antioqueño, Boyacá y Santander en estas regiones y el río Magdalena.

Otro tipo de suelo se encuentra en el piedemonte del Perijá, y está formado por los sedimentos provenientes de la serranía del Perijá, en Cesar, que a su vez son producto de las frecuentes inundaciones que sufre la zona. Se ubican entre los municipios de Aguachica y Tamalameque, en clima cálido seco. El hecho de estar constituidos por limos y arcillas sedimentadas. (Atlas cuenca del río Magdalena)

De acuerdo con lo anteriormente expuesto, el objetivo específico de intentar caracterizar perfiles de suelo que correspondan a los distintos tipos de ríos de Colombia, en función de las características geotécnicas de cada uno, es una labor demasiado extensa, y la influencia dentro del objetivo general del presente proyecto de grado es poco significativa.

Por todo lo anterior se opta por trabajar con un suelo de un caso específico para aplicar la metodología, en lugar de definir un perfil típico tal como se había propuesto en el protocolo del presente trabajo. Dicho caso de aplicación se definirá en el **Capítulo 6**.

1.3 Análisis del comportamiento del fondo de los ríos

El movimiento de los sedimentos en las corrientes y ríos presenta dos formas, la primera corresponde a los sedimentos en suspensión los cuales corresponden a las partículas más finas mantenidas en suspensión por los remolinos de la corriente y que sólo se asientan cuando la velocidad de la corriente disminuye, o la corriente descarga en un pozo o lago. Y la segunda corresponde a las partículas sólidas de mayor tamaño, estas son arrastradas a lo largo del lecho de la corriente y se designan con el nombre de arrastre de fondo.

Las cantidades relativas que avanzan en suspensión y el arrastre de fondo varían considerablemente. En un extremo, cuando el sedimento procede de un suelo de grano fino como el limo depositado por el viento, o una arcilla aluvial, el sedimento puede estar casi totalmente en suspensión. En el otro extremo, una corriente de montaña limpia y rápida puede tener cantidades insignificantes de materia en suspensión y casi la totalidad del movimiento de las gravas, arenas y piedras se produce en el lecho de la corriente. Concentraciones elevadas de sedimento como las que se dan en algunos ríos, pueden causar cambios significativos en las propiedades de resistencia del agua. La viscosidad será mayor y la velocidad de asentamiento de las partículas inferior.

Es un hecho que la velocidad del agua en la parte más profunda del río tiende a ser menor por la fricción del agua contra el fondo, dicha distribución de velocidad se puede observar en la **Figura 6** Distribución de velocidades en un río.

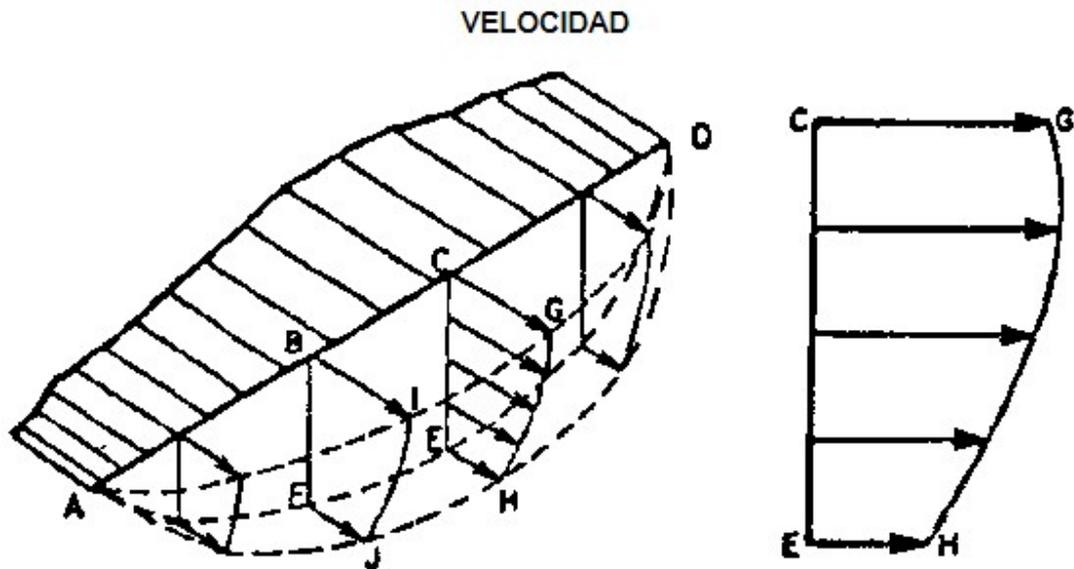


Figura 6 Distribución de velocidades en un río

Fuente. <http://www.fao.org/docrep/T0848S/t0848s02.htm#TopOfPage>

El movimiento del agua que circula por el cauce de una corriente de agua produce el desprendimiento y posterior transporte de los materiales que conforman su perímetro mojado, el cual puede ser definido como aquella porción de la sección transversal que queda en contacto con el agua. De forma general, en una cañada o río pueden tenerse dos tipos de erosión, una lateral que amplía su ancho y una vertical que produce la profundización del cauce (Suárez, 1992). El control de la erosión en corrientes de agua atiende entonces en forma directa ambas situaciones, a efectos de lo cual opta o bien por la desviación de los flujos sobre las áreas más vulnerables, o bien por favorecer las características de resistencia del perímetro mojado a la acción del agua (Suárez, 1992).

Características propias del material y cubrimiento permiten grados diferenciales de respuesta a la acción erosiva del agua en los canales; así, la erosión en ellos depende de las características geotécnicas de los materiales del fondo y los taludes, de su geometría, pendiente y características del flujo de agua (Suárez, 1992). Por la vía del ejemplo, terrenos alledaños a corrientes de agua de naturaleza arenosa o con proporciones grandes de materiales gruesos como grava y cascajo, ofrecen poca resistencia a la capacidad abrasiva y de arrastre de la corriente, situación agravada cuando la presencia de vegetación es escasa (Suárez, 1980); de acuerdo

con esto, para cada tipo de suelo se tienen diferentes velocidades a las cuales se produce arrastre.

Tabla 4. Velocidades a la cuales se produce erosión.

Tipo de material	Velocidad agua limpia (m seg ⁻¹)	Velocidad agua con sedimentos (m seg ⁻¹)
Arena fina	0,45	0,76
Suelo arenoso	0,53	0,76
Limo aluvial	0,60	1,06
Ceniza volcánica	0,76	1,06
Arcilla dura	1,14	1,52
Lutitas	1,82	1,82
Grava fina	0,76	1,52
Grava gruesa	1,22	1,82
Cantos	1,52	1,67

Fuente: Suarez 1992

Para comprender y evaluar adecuadamente la capacidad erosiva de las corrientes de agua, es necesario conocer la dinámica de los ríos, desde el momento en que se originan o nacen, hasta que mueren al desembocar en otras corrientes o cuerpos de agua; para estos efectos han sido desarrolladas 58 clasificaciones de morfología fluvial que describen en forma genérica el comportamiento de las corrientes según éstas se localicen en su recorrido. Pueden ser diferenciadas a efectos interpretativos cuatro etapas o edades básicas (Suárez, 1992): Niñez, Juventud, Madurez y Vejez; se destaca la primera etapa o Niñez, la cual se considera básica en el estudio del fenómeno erosivo en países tropicales de alta montaña, afirmándose que el modelo de ríos iniciando en su juventud no es aplicable a las corrientes de tales regiones; la descripción de estas cuatro etapas se presenta a continuación.

Etapa de Formación o Niñez. Cada corriente en zonas de alta montaña posee una cuenca de drenaje en forma de embudo, con laderas de fuerte pendiente (>6%); dicha cuenca, en la cual se está formando la corriente principal de agua, se encuentra conformada por varias corrientes bien sean de flujo continuo o intermitente. La erosión que se produce es de tipo laminar, en surcos y en cárcavas, siendo el área que mayor aporte de sedimentos hace por concepto de erosión (Suárez, 1992). Son característicos además pequeños cauces semirectos con cambios bruscos de pendiente y dirección, así como cauces en “V” con fuertes taludes laterales. Villota (1991) expone que en esta fase de denudación se presenta una fuerte meteorización de las rocas, las corrientes de agua profundizan intensamente sus valles y posteriormente ganan anchura gracias a la incidencia

erosiva de los tributarios y al desplome gravitacional de sus paredes; de esta forma, las áreas interfluviales se estrechan progresivamente y los sistemas de drenaje aumentan sus ramificaciones, perdiendo así identidad las geoformas iniciales (pliegues, volcanes, etc.).

En la etapa de Juventud las principales características de las corrientes de agua tienen que ver con las pendientes moderadas y grandes velocidades del agua; se presenta el fenómeno conocido como “corrasión” o profundización del fondo del cauce, proceso que se acelera al ser transportadas por las aguas partículas de gran tamaño como arena, gravas y cantos, pudiéndose desarrollar “gargantas angostas” o cañones de taludes semiverticales y trayendo consigo deslizamientos (inestabilidad lateral). En este sector suelen encontrarse acumulaciones de materiales provenientes de la zona de Formación o Niñez (Suárez, 1992).

La siguiente etapa es la de madurez, en donde existen menores valores de pendiente, el proceso que caracteriza esta zona es de tipo cíclico: socavación, transporte y nuevamente sedimentación; esto es, la erosión que se produce en el lecho es sólo momentánea, ya que, al disminuirse la velocidad del agua, se produce sedimentación. En esta etapa se comienzan a presentar divagaciones del cauce, que permiten el desarrollo de meandros. (Suárez, 1992).

La etapa de vejez corresponde a sectores caracterizados por bajos valores de pendiente, prácticamente del 0%, previa entrega de caudales de las corrientes al mar, formándose deltas al dividirse en cauces menores. Aunque no se presenta erosión vertical, tienen lugar movimientos laterales de los cauces; el proceso de mayor importancia es el de sedimentación (Suárez, 1992). Villota (1991) describe esta etapa como la reducción del paisaje pasando de superficies colinadas a onduladas, con algunos relieves residuales de poca extensión, y más frecuentemente, con algunos montes aislados

De acuerdo a lo anteriormente expuesto, al momento de realizar el cálculo de la profundidad de instalación de una tubería y su chequeo por flotación, este debe realizarse a partir del nivel de fondo previsto, luego de ser erosionado en un tiempo de diseño determinado.

Capítulo 2 Tipos de tecnologías sin zanja para obra nueva

Al momento de realizar un cruce subfluvial, lo más convencional es hacer una zanja en el lugar donde finalmente quedara instalada la tubería, y para poder realizar este trabajo se debe hacer el desvío de cauce del río. Esto generalmente consiste en la construcción de túneles o canales de desviación los cuales permitan tener seco el sitio de trabajo.

El método de zanja a cielo abierto es un método para la instalación de tuberías a diferentes distancias y de diferentes diámetros, pueden ser realizadas de manera mecánica o manual, estas deben estar diseñadas de tal manera que se garantice la estabilidad de los taludes laterales, esto con el fin de evitar accidentes.

La actividad de excavación comprende la remoción de material para la construcción de redes de servicios públicos, los anchos de las zanjas y la verticalidad de las paredes de la excavación varían directamente con el tipo de suelo, diámetro de la tubería a instalar y la profundidad.

Con el fin de evitar la construcción de obras adicionales y disminuir al máximo la alteración de las orillas de los ríos, se han venido desarrollando las tecnologías de obra nueva que se explican a continuación.

2.1 Perforación Horizontal Dirigida

La perforación horizontal dirigida es una tecnología orientable que permite la instalación de tuberías sin la necesidad de abrir zanjas a cielo abierto. Se utiliza cuando el proyecto tiene la necesidad de salvar alguna distancia por un paso ineludible como una autopista, ferrocarril, construcción, bosque o río. Esta tecnología permite realizar dichas instalaciones sin la necesidad de interrumpir actividades en superficie como construcciones en servicio o cauces de ríos, siempre generando el mínimo impacto ambiental.

Este método se basa en una perforadora guiada por rotación, utilizada para realizar una perforación piloto, la cual sigue una ruta planificada, en este caso, la fuerza de empuje es proporcionada por la plataforma de perforación y por la rotación del varillaje, los equipos utilizados son hidráulicos y son capaces de generar 3 fuerzas: empuje, rotación y tiro.

2.1.1 Procedimiento constructivo

El proceso de construcción se realiza en 2 etapas:

La primera etapa comprende la construcción de una perforación piloto, para poder iniciar con la perforación piloto primero se debe realizar la instalación de la plataforma para el equipo de perforación en el lugar en donde se va a realizar el cruce, igualmente se pueden instalar generadores, bombas y demás. Se debe realizar un pozo de acceso previo, el cual puede ser realizado por medio de un barreno manual, para posteriormente poder iniciar con la perforación; conforme la perforación piloto va avanzando, se va realizando el monitoreo y las correcciones necesarias a la trayectoria de la broca, estas maniobras se realizan con el fin de mantener el trazado de diseño, el diámetro de dicha broca puede variar de 1" a 5".

En la **Figura 7** se muestra el esquema de la perforación piloto, en la parte izquierda se muestra la ubicación del equipo en superficie y hacia la derecha se puede observar el trazo de la perforación piloto

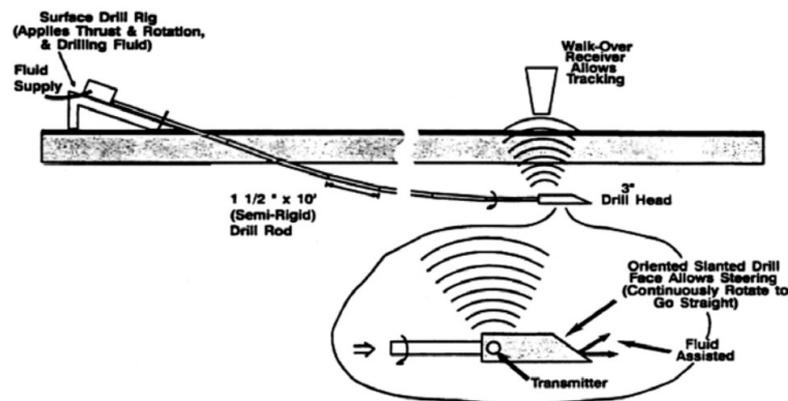


Figura 7 Proceso de ejecución de la perforación piloto
 Fuente. Santiago Felicidad Minguez (2015).

La segunda etapa inicia luego de finalizada la perforación piloto, luego de que la broca llega al pozo de salida, se cambia la broca y se coloca en el varillaje un expansor aproximadamente un 50 % mayor al diámetro de la broca, para ser jalado desde el primer pozo, a medida que el expansor es retirado se va vertiendo bentonita con el fin de mantener la integridad de la perforación.

En la **Figura 8** se ilustra el esquema de como el expansor es jalado desde la superficie para el ensanchamiento de la perforación piloto. Adicionalmente, en la **Figura 9** Tipos de expansores podemos observar los diferentes tipos de expansores.

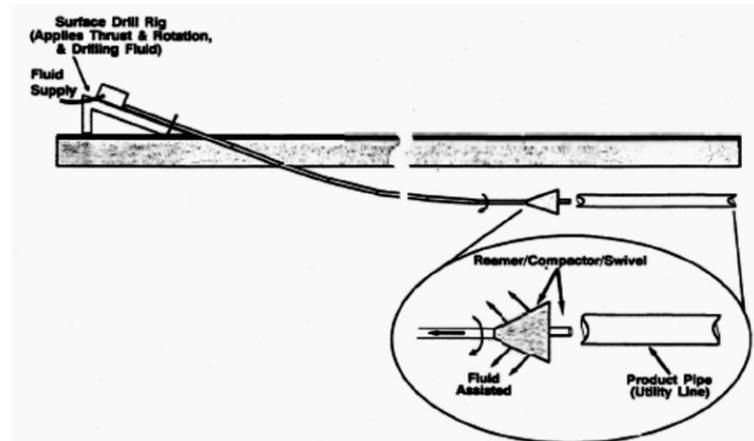


Figura 8 Proceso de ejecución del ensanchamiento de la perforación piloto
 Fuente. Santiago Felicidad Minguez (2015)

Para poder revisar el estado de la broca y su dirección, se acopla a una sonda que emite señales que son registradas en superficie indicando dirección y profundidad de la broca. Este sistema desde superficie se llama Walk Over, este sistema solo se puede emplear en perforaciones que no tiene mucha profundidad. Cuando la profundidad es muy grande se utiliza un método llamado wire-line, en el cual la información es enviada a superficie por medio de un cable que está dentro de la perforación.



Figura 9 Tipos de expansores
 Fuente <http://www.geocoredrill.com/es/HDD-Reamer-products.html>

La tubería utilizada para el varillaje debe ser capaz de resistir los esfuerzos de compresión y tensión que ejerce el equipo durante las dos etapas de construcción, las longitudes y diámetros a utilizar dependen directamente del tipo de máquina a emplear de acuerdo al diámetro y la longitud máxima de la perforación. Ver **Figura 10** Varillaje para perforación horizontal dirigida.



Figura 10 Varillaje para perforación horizontal dirigida
Fuente <http://www.geocoredrill.com/es/HDD-Reamer-products.html>

2.1.2. Tipos de perforación horizontal dirigida

La perforación horizontal dirigida se puede clasificar en 3 tipos: perforaciones de diámetros grandes, medianos y pequeños.

2.1.2.1. Mini HDD

Las perforaciones de pequeño diámetro se realizan por medio del sistema Mini-HDD, la dirección de la perforación está dada por la forma de la broca, esta tiene un bisel que gira a revoluciones bajas y controladas. Generalmente se realiza una perforación asistida por fluidos; dichos fluidos son bombeados por el interior de la tubería y regresan por el espacio restante entre la tubería y la perforación, el fluido regresa con el material producto de la perforación, estos pueden ser utilizados de 2 maneras, con recirculación del fluido o con suspensión del fluido.



Figura 11 Cabezas de perforación horizontal dirigida Mini-HDD

Fuente. <http://www.geocoredrill.com/es/HDD-Pilot-Bit-products.html>

En el método de recirculación de fluidos, el material producto de la perforación es retirado al inyectar fluido de perforación, luego se limpia la perforación para luego ser llenada nuevamente por más fluido de perforación, este método tiene la desventaja del alto consumo de fluidos de perforación, el segundo método de suspensión de fluido no requiere retirar el material de la perforación, sencillamente lo mantiene en suspensión dentro de la perforación, este sistema es más usado en los sistema medianos y grandes.

2.1.2.2. Midi HDD, Maxi HDD

En las perforaciones de gran diámetro la broca que realiza la perforación va dentro de una camisa metálica la cual tiene entre sus funciones la de transportar los escombros producto de la perforación, reducir la fricción y dar rigidez al equipo, adicionalmente esta camisa cuenta con una curvatura, la cual sirve para desviar el eje de la broca. Es decir, para seguir una trayectoria curva se debe empujar la camisa sin girarla y para una trayectoria recta se debe girar y empujar la camisa. Los cambios de dirección se tienen también por cambios en la presión y dirección de los chorros de la broca.

La trayectoria de la perforación se controla desde superficie por medio de receptores que pueden ser electromagnéticos o sistemas de detección por medio de cables y sensores. Estos indican generalmente datos relevantes tales como: profundidad,

orientación y temperatura. Los diferentes procedimientos de navegación se pueden clasificar según su campo de utilización (Ibsstt, 2013). Ver **Tabla 5** Diferentes procedimientos de navegación de PHD.

Tabla 5 Diferentes procedimientos de navegación de PHD

Sistema de navegación		Profundidad máxima de perforación	Accesibilidad por encima del eje de perforación	Interferencia debida a campos magnéticos
Walk- Over		+ - 20 m	Si	Si
Wire - Line	Sin campo magnético artificial	>100 m	No	Si
	Con campo magnético artificial	+ - 50 m	Si	Ligero
Gyro compass		>100m	No	No

Fuente: Asociación Ibérica de Tecnologías sin Zanja (2013)

Los fluidos de perforación son compuestos formados por agua, bentonita y/o polímeros, su principal función es mantener la integridad de la perforación, pero también cumplen funciones de lubricación, reblandecimiento del terreno para mejorar el avance la broca, el de banda transportadora de los escombros de la perforación y de refrigeración, previniendo así el desgaste prematuro de las brocas. Es de anotar que el uso de fluidos es muy importante al punto que puede ser determinante en el éxito de un proyecto.

Existen dos tipos de brocas para realizar la perforación, uno funciona por medio de agua presión y el otro por rotación y ayuda de fluidos de perforación, arenas, arcillas piedras no compactas, el agua presión es utilizada para sedimentos, arcillas depositadas o arenas, existe la posibilidad de realizar la perforación en seco, pero esto se realiza solo cuando las condiciones del terreno son excelentes. Ver **Figura 12** Brocas de perforación PHD.



Figura 12 Brocas de perforación PHD

Fuente. Terra trenchless technologies

Para la ejecución de cualquiera de las metodologías de perforación horizontal subterránea se deben establecer completamente las condiciones geotécnicas del lugar, se deben definir parámetros de los materiales y su formación. Al igual que determinar propiedad índice, límites de consistencia, granulometría y los parámetros de resistencia.

2.1.3. Equipos

El equipo de perforación horizontal dirigida está compuesto de 3 partes, la primera corresponde a la herramienta de excavación (punta) que realiza la perforación inicial y condiciona el tipo de material a excavar.

En el mercado actual las herramientas de perforación se ajustan a suelos y rocas tanto duras como blandas, la variedad y aplicabilidad de las mismas puede ser consultada en la siguiente dirección:

<http://www.tecmeco.com/wp-content/uploads/2016/10/HDD-tools-catalog-8.pdf>.

La segunda corresponde al diámetro del ensanchador, este ensanchador puede ser utilizado en varias pasadas, pero nunca se obtendrá más del doble del diámetro de la perforación, el ensanchador más grande que se encuentra en el mercado corresponde a un diámetro de 40" y es aplicable para materiales duros y blandos, su variedad y aplicabilidad puede ser consultada en la dirección anterior.

La tercera parte es el equipo que proporciona la potencia tanto de empuje como de jalado, en la actualidad existe una gran variedad de máquinas de perforación, estas se pueden clasificar según IBSTT en función de la fuerza de tiro y el peso del equipo, es de anotar que la capacidad de cada máquina se escoge en función del diámetro a instalar y la longitud a salvar.

Tabla 6 Clasificación de máquinas perforadoras PHD

Tipo de perforadora	Fuerza máxima de tiro (Kn)	Par máximo (Kn)	Peso (Ton)
Mini		< 10	< 10
Midi	>150 hasta 400	10 – 30	10 – 25
Maxi	400 hasta 2500	30 – 100	25 – 60
Mega	>2500	>100	>60

Fuente: Asociación Ibérica de Tecnologías sin Zanja (2013)

La variedad y aplicabilidad de los diferentes tipos de perforadora puede ser consultada en la siguiente dirección:

<http://www.tecmeco.com/categoria/perforacion-horizontal-dirigida/?from=productos-y-tecnologias&guide=MzE=>

La limitante de estos equipos se da en las condiciones del suelo ya que deben ser estables. Por lo tanto, no se puede aplicar en gravas o arenas sueltas.

2.1.4. Aplicabilidad de la metodología

Los terrenos arcillosos son los ideales para la aplicación de este método, arenas arcillosas finas y cohesivas se comportan muy bien. Para diámetros grandes se puede utilizar también en formaciones rocosas blandas y suelos granulares, para pequeños diámetros o suelos granulares (con porcentaje de grava mayor a 50 %) este método no se puede utilizar, la razón es principalmente la estabilidad de la perforación.

Es de suma importancia conocer la distribución granulométrica del terreno, esto se debe a que en el momento de retirar los escombros producto de la excavación, estos deben flotar en los fluidos de perforación, si las partículas son muy grandes obligan a que la densidad del lodo sea mayor haciéndolo difícil de manejar, los fabricantes de insumos establecen partículas mayores a $\frac{3}{4}$ " no pueden ser transportados por fluidos viscosidades manejables, por lo tanto, trabajar en suelos gruesos no es recomendable.

Tabla 7 Aplicabilidad de PHD según el tipo de material

TIPO DE MATERIAL	% G	APLICABILIDAD
Arcilla muy blanda a muy fuerte, con presencia de fracturas por desecación	0	Buena a excelente. El comportamiento del terreno circundante a la perforación piloto es bastante estable, la presión durante la perforación genera que los fluidos de perforación penetren en las fisuras de la arcilla. Así mismo, en los lugares en donde se presente arcilla dura rodeada por suelos considerablemente débiles y/o sueltos, si esta perforación no es ejecutada con el suficiente ángulo de inclinación puede dar como resultado que la broca de la de perforación brinque a lo largo de la frontera de los materiales duros y débiles. Las dificultades en el direccionamiento de la sarta de perforación son muy similares a las que se presentan cuando se atraviesan capas muy blandas
Arena muy suelta a muy densa con o sin trazas de gravas	0 a 30	Buena a excelente. La presencia de gravas puede causar ligeros problemas de direccionamiento de la perforación, también pueden resultar algunas imprecisiones en el direccionamiento pueden también resultar de atravesar materiales muy sueltos Es necesario el empleo de lodos de perforación con la viscosidad, presión y volumen adecuados a las condiciones presentes para mantener la estabilidad de la perforación durante las etapas de perforación y ensanchamiento, especialmente en estratos sueltos.
Arena poco gravosa de muy suelta a muy densa	30 a 50	Marginalmente aceptable Las características y manejo de los lodos de perforación son críticos para lograr perforaciones horizontales y/o ejecutar curvas horizontales/verticales. Mientras que la penetración inclinada de un estrato normalmente presenta pocos problemas con el lodo de perforación apropiado Operaciones de inyección adicionales probablemente sean requeridas para limpiar la perforación ensanchada antes de colocar la tubería.
Arena gravosa de muy suelta a muy densa	50 a 85	Cuestionable La penetración horizontal para cualquier distancia apreciable, considerando la conducción en curvas, puede ser extremadamente difícil, sin considerar la calidad del fluido de perforación. La penetración inclinada hacia/desde una capa perforable horizontalmente es posible pero el direccionamiento de la perforación piloto puede ser impreciso.
Grava de muy suelta a muy densa	85 a 100	Inaceptable Con la tecnología y experiencia presente especialmente en estratos densos, es casi imposible Tales materiales deben ser evitados o transitados en ángulos pronunciados.
Roca	0	Excelente a inaceptable Los materiales suaves y/o parcialmente meteorizados le ofrecen a la técnica PHD condiciones parecidas a las de las arcillas duras, si se encuentra en un estado sólido, la tecnología de perforación, si bien consume tiempo y es costosa, es adecuada para perforar a través de roca más competente, especialmente en el plano horizontal débil, sin embargo, la penetración de roca sólida, después de atravesar suelo no sedimentado o litificado puede entorpecerse debido a la tendencia de la broca a "saltar" a lo largo de la superficie dura e inferior si se encuentra en una formación de cantos rodados, la perforación en roca competente es virtualmente imposible.

Fuente: Hair, Charles W, III (1994)

En todos los suelos se debe tener en cuenta a la hora de ejecutar la obra las posibilidades de fracturación hidráulica. Esta se presenta cuando la presión de los lodos de perforación supera la resistencia de suelo donde se realiza la perforación generando igualmente que los lodos de perforación fluyan a través de las fracturas. Lo

anterior se puede dar por presencia de planos de debilidad o la existencia de rutas de drenaje como rellenos o estratos de arenas o gravas, también a mayor longitud se deben bombear los lodos con mayor presión, lo que aumenta la posibilidad de que se genere este fenómeno.

2.1.5. Ventajas y desventajas de la metodología

En la **Tabla 8** Resumen ventajas y desventajas PHD se resumen las ventajas y desventajas de la metodología

Tabla 8 Resumen ventajas y desventajas PHD

Ventajas	Desventajas
Velocidad de instalación	No se debe usar en suelos granulares
Se pueden salvar largas distancias	No funciona con diámetros inferiores a 3"
La dirección se puede controlar	El área necesaria para el acceso es grande por la cantidad de equipos requeridos
Nivel controlable	El área necesaria para el acceso es grande para el ensamble de la tubería
Diámetros grandes, hasta 60"	

Fuente: El autor

2.2 Métodos de compactación de suelo

Esta tecnología sin zanja se basa en que la perforación para la tubería se realiza por desplazamiento del suelo por medio de un mecanismo de empuje. Lo que genera consecuentemente la compactación del suelo. La punta realiza la perforación en suelo por medio de una fuerza de empuje. Básicamente el volumen de suelo es compactado en el perímetro de la perforación en lugar de ser retirado y botado en otro lugar. Por supuesto estos métodos están limitados a suelos que permitan que esta compactación ocurra.

2.2.1. Procedimiento constructivo

Los métodos de compactación de suelo son bastante simples, y se realizan generalmente entre 2 pozos de acceso previamente excavados, uno para lanzar la punta y el otro para recibirla.

Inicialmente se realiza una perforación de prueba empujando una punta de compactación entre los dos pozos. Posteriormente, la punta de compactación es empujada de un pozo a otro. Se debe tener en cuenta que la punta de compactación

debe ser de un diámetro mayor o igual al diámetro del varillaje. Cuando la punta llega al pozo siguiente se procede a retirar el varillaje y a instalar la nueva tubería. Es posible que se necesite una herramienta de ensanchamiento de la perforación. Las diferentes puntas se muestran en la **Figura 13** Puntas de compactación.

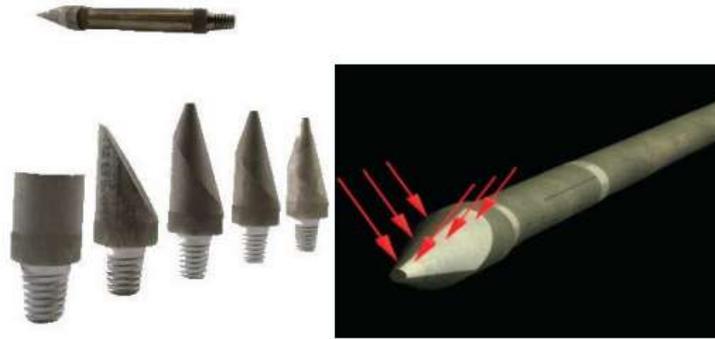


Figura 13 Puntas de compactación
Fuente. Santiago Felicidad Minguez (2015)

Si bien es cierto que la fuente de energía de empuje puede ser variada (desde la pala de una retroexcavadora), normalmente se diseña un marco especial con un gato hidráulico, con el fin de aumentar la precisión y la eficiencia del método, el modo de funcionamiento de este método consiste en empujar sin giro y sin impacto.

2.2.2. Tipos de método de compactación de suelo

Existen dos métodos para realizar dicha compactación del suelo, la perforación empujada y la perforación percusiva por impacto, como sus nombres lo indican se diferencian principalmente en la energía que utilizan para la perforación, en la perforación percusiva por impacto se utiliza energía dinámica que por medio de un martillo autopropulsado empuja el dispositivo y en la perforación empujada la energía de perforación es estática, esta última es transmitida por medio de un varillaje conectado a un gato hidráulico.

2.2.2.1. Perforación empujada (thrust boring)

En este método la punta de perforación está conectada a un varillaje rígido que a su vez está conectada a una fuente de energía como un gato hidráulico.

2.2.2.2. Perforación percusiva por impacto (Impact moling)

En este método la perforación se realiza por medio de un martillo neumático que consta de un tubo cilíndrico hueco en acero con una cabeza cilíndrica en forma de torpedo en la punta y en el interior un pistón de impacto. Este pistón está conectado por medio de una manguera a una fuente de alimentación neumática que empuja el pistón hacia la punta, generando así una fuerza dinámica que empuja el suelo permitiendo el avance de la perforación, la fricción creada entre las paredes exteriores del cilindro metálico y la masa de suelo evita que el martillo se regrese.



Figura 14 Martillo de impacto

Fuente. <https://www.coppard.co.uk/pages/quick-links/moling-equipment.php>

Como se puede observar en la **Figura 15** Esquema de funcionamiento del martillo de impacto, el aire comprimido empuja el pistón, el cual impacta en una punta sólida (1), transmitiendo la energía a la punta del martillo (2), esta desplaza el suelo facilitando el movimiento del dispositivo hacia adelante, compactando por consecuencia el suelo, la punta que penetra el suelo está montada en un resorte interno, el cual permite que toda la energía del golpe sea transmitida al suelo, si este resorte no existiera la energía del impacto debería también vencer la fricción interna dentro del equipo disminuyendo así su eficiencia.

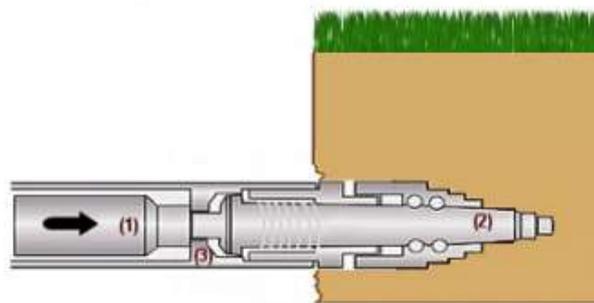


Figura 15 Esquema de funcionamiento del martillo de impacto

Fuente. <https://www.coppard.co.uk/pages/quick-links/moling-equipment.php>

Hoy en día estos martillos están equipados con mecanismos que permiten su fácil extracción en caso de que se encuentre con un obstáculo inesperado o que la perforación se desvíe del rumbo. También existen mecanismos que permiten reorientar el rumbo con el fin de conseguir trayectos curvos.

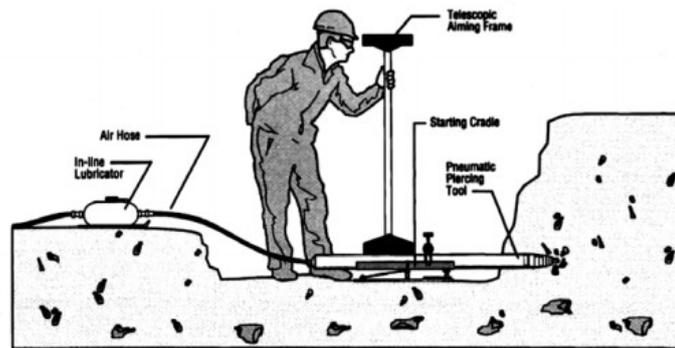


Figura 16 Proceso de ejecución del método de perforación percusiva por impacto
Fuente. Santiago Felicidad Mínguez (2015)

Con el fin de obtener una buena alineación se puede montar el martillo sobre una plataforma estable y por medio de un teodolito o nivel de topografía dar la alineación de la perforación.

El diámetro máximo de la perforación será el mismo del cilindro de acero del martillo.

2.2.3. Equipos

Para la ejecución de la perforación empujada se encuentran equipos los cuales tienen la capacidad de instalar tuberías hasta de 10" de diámetro con una eficiencia de 5 pies / min, su variedad y aplicabilidad puede ser consultada en la siguiente dirección:

<http://powrmole.com/directional-trust-boring-pd7.html>

Para la ejecución de la perforación percusiva por impacto se consultaron varios equipos, siendo los más sobresalientes los cabezales de la marca Hammerhead, estos cabezales están contruidos para instalar tuberías de 6" de diámetro, la elección de uno u otro cabezal dependerá directamente del tipo de terreno a excavar, su variedad y aplicabilidad puede ser consultada en la siguiente dirección:

<http://www.tecmeco.com/categoria/topos-neumaticos/?from=productos-y-tecnologias&guide=MzE=>

2.2.4. Aplicabilidad

El rendimiento típico de este método es de 1.2 m / min, pero la eficiencia depende principalmente de 2 factores: el primero depende de las características del suelo como la presencia de limos o arcillas, el grado de consolidación o la gradación, los suelos con índice de vacíos alto son más susceptibles a la compactación y por ende son más fáciles de atravesar, no se recomienda en suelos con densidades altas.

Además de que si existe la presencia de nivel freático no es recomendable. La segunda depende de la punta de compactación, para escoger una punta ideal se debe tener en cuenta la velocidad de avance y la estabilidad de la perforación, cuando el suelo es muy blando y la perforación muy colapsable se recomienda disminuir la velocidad y avanzar aplicando mayor fuerza de empuje.

Tabla 9 Aplicabilidad métodos de compactación de suelo

TIPO DE MATERIAL	% G	APLICABILIDAD
Arcilla muy blanda a muy fuerte, con presencia de fracturas por desecación	0	Buena a excelente. El comportamiento del terreno circundante a la perforación piloto es bastante estable, la presión durante la perforación genera la compactación del terreno circundante
Arena muy suelta a muy densa con o sin trazas de gravas	0 a 30	Buena. La presencia de gravas puede causar ligeros problemas de direccionamiento de la perforación, también pueden resultar algunas imprecisiones en el direccionamiento pueden también resultar de atravesar materiales muy sueltos Es necesario el empleo de mayor fuerza de empuje y disminución de la velocidad para mantener la estabilidad de la perforación durante las etapas de perforación y ensanchamiento, especialmente en estratos sueltos.
Arena poco gravosa de muy suelta a muy densa	30 a 50	Buena. La presencia de gravas puede causar ligeros problemas de direccionamiento de la perforación, también pueden resultar algunas imprecisiones en el direccionamiento pueden también resultar de atravesar materiales muy sueltos Es necesario el empleo de mayor fuerza de empuje y disminución de la velocidad para mantener la estabilidad de la perforación durante las etapas de perforación y ensanchamiento, especialmente en estratos sueltos.
Arena gravosa de muy suelta a muy densa	50 a 85	Cuestionable La penetración horizontal para cualquier distancia apreciable, considerando la conducción en curvas, puede ser extremadamente difícil, sin considerar el poco grado de compactación, adicionalmente el direccionamiento de la perforación piloto puede ser impreciso.
Grava de muy suelta a muy densa	85 a 100	Inaceptable Con la tecnología y experiencia presente especialmente en estratos densos, es casi imposible Tales materiales deben ser evitados
Roca	0	Inaceptable Con la tecnología y experiencia presente especialmente en estratos densos, es casi imposible Tales materiales deben ser evitados, la perforación en roca competente es imposible.

Fuente: El autor

Las longitudes máximas para la utilización de este método son de 10 m a 50 m y el diámetro máximo es de 12", generalmente para diámetros superiores a 6" requiere repetir el procedimiento en varias ocasiones para agrandar el diámetro.

2.2.5. Ventajas y desventajas

En la **Tabla 10 Resumen ventajas y desventajas métodos de compactación** se presentan las ventajas y desventajas de la metodología.

Tabla 10 Resumen ventajas y desventajas métodos de compactación

Ventajas	Desventajas
Las excavaciones necesarias para los pozos son pequeñas (máximo 1 m ²) lo que indica que la alteración del terreno es muy poca.	No se debe usar en suelos granulares
La operación del método es bastante sencilla, el empuje del varillaje se puede realizar entre 2 personas.	No funciona con grandes diámetros
La excavación requerida puede ser realizada de manera manual	Este método tiene la desventaja de que no se puede controlar fácilmente la dirección de la perforación, además de que la punta del varillaje tiende a desviarse por el camino de menor resistencia
Por ser un método de compactación de suelo, no es necesario el retiro de escombros al momento de realizada la perforación, por lo que se refleja en un menor impacto ambiental.	Gran parte del éxito de esta metodología depende directamente de la correcta instalación del aparato al momento del inicio, en caso de encontrar un obstáculo que no se pueda romper, se debe retirar el varillaje y comenzar el proceso de nuevo
Costos de operación bajos	En material no consolidado, la energía impacto haga consolidar el suelo generando así hundimientos en superficie.

Fuente: El autor

2.3 Perforación e hincas de tubería por golpeo (Pipe Ramming)

La hincas de tubería por golpeo es una técnica de instalación de tuberías sin zanja no direccionable, que hincas tubería de acero de manera horizontal y de diferentes diámetros. Esta tubería de acero es de frente abierto con el fin de poder retirar el escombros producto de la excavación. Dicho escombros se retira por medio de aire comprimido o por medio de agua a presión.

La energía de impacto se obtiene por medio de un martillo neumático o hidráulico que golpea el tubo de acero, esta tubería debe ser de acero ya que es un material resistente a las fuerzas de impacto del martillo, luego de terminada la perforación la tubería puede ser utilizada como recubrimiento del tubo a instalar o utilizarlo como ducto final.

2.3.1. Procedimiento constructivo

Para iniciar el procedimiento se debe construir un pozo de entrada con un piso sólido, generalmente se construye una placa en concreto armado, se instalan unos rieles de apoyo para la tubería y se inicia con el hincado, por acción del martillo de percusión el suelo es desplazado dentro de la tubería de acero y el tubo entra en el terreno, al finalizar la hinca del primer tubo se retira el martillo y se solda un segundo tubo, este proceso se repite hasta llegar al pozo de recepción. Es de saber que la tubería siempre corre el riesgo de desplazarse hacia abajo por acción de la gravedad.

En la **Figura 17** se muestra el esquema del pipe ramming.

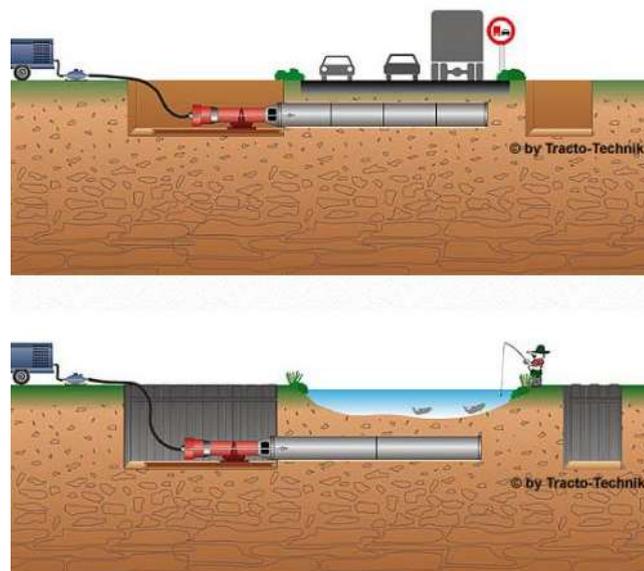


Figura 17 Esquema pipe ramming

Fuente. http://america.pink/pipe-ramming_3522548.html

Luego de finalizada la hinca de la tubería se procede a limpiar el interior de la tubería, esto se puede realizar por medio de agua y aire a presión para pequeños diámetros, para grandes diámetros se usa un tornillo sin fin.

2.3.2. Tipos de métodos de Pipe Ramming

Existen dos variables en la tecnología de Pipe Ramming; hincas de tubería con frente cerrado, la cual consiste en la instalación de la tubería utilizando una cabeza cónica para la penetración del suelo. La segunda variable consiste en utilizar la tubería sin ninguna clase de cabeza de penetración, es decir la tubería que penetra es hueca lo que permite mantener las condiciones iniciales del suelo (Santiago, 2015).

2.3.3. Equipos

En la aplicabilidad del Pipe Ramming nos encontramos con el equipo Grundoram de marca TT Technologies, este equipo tiene la capacidad de instalar tuberías desde 4" hasta 80", este equipo tiene la capacidad de realizar la instalación de tubería para longitudes de hasta 130m.

Su variedad y aplicabilidad puede ser consultada en la siguiente dirección:

<http://www.tttechnologies.com/products/grundoram-pneumatic-pipe-ramming/>

2.3.4. Aplicabilidad

Esta técnica abarca una amplia gama de suelos ya que no posee problemas de integridad de la perforación. El único tipo de suelo donde no se recomienda es en roca. Se debe evaluar la sensibilidad del suelo a vibraciones y a subsidencia, se recomienda que la profundidad mínima de instalación sea 10 veces el diámetro de la tubería.

2.3.5. Ventajas y desventajas

En la **Tabla 11** Resumen ventajas y desventajas Pipe Ramming se presentan las ventajas y desventajas de la metodología.

Tabla 11 Resumen ventajas y desventajas Pipe Ramming

Ventajas	Limitaciones
El tiempo de puesta en marcha y ejecución es bajo	Solo funciona con tubería de acero
Funciona en terrenos donde existan fragmentos de roca	Longitudes cortas Max 100m
Costos bajos	No se pueden realizar cambios de dirección.
Bajo impacto en la superficie	
Diámetros grandes y variables (4" a 84")	

Fuente. El autor

2.4 Perforación horizontal con tornillo sin fin (Auger Boring)

Esta tecnología también es conocida como perforación horizontal con tornillo sin fin o con tornillo helicoidal. Es generalmente usada para instalar tubería con revestimiento de acero en suelos blandos con condiciones estables como arcillas o suelos con contenido de rocas sueltas pequeñas localizadas por encima del nivel freático. En el proceso de instalación el Auger Boring conserva los suelos dentro de una carcasa lo cual reduce la probabilidad de asentamiento del terreno en la excavación, haciendo del Auger Boring una opción para la instalación de tuberías por debajo de vías de trenes, carreteras o situaciones donde los asentamientos son una gran preocupación. La perforación se realiza con una broca con bordes de corte tipo cincel, dicha broca tiene una cabeza de corte giratorio que se abre paso en el suelo a medida que la fuerza de hincado es proporcionada por unos cilindros de empuje hidráulico. Mientras que la excavación avanza los sobrantes del suelo excavado se van transportando hacia el pozo de entrada o lanzamiento por medio del tornillo sin fin, a su vez se van añadiendo secciones de tubería para ser empujadas por los cilindros hidráulicos. Comúnmente el tornillo sin fin se opera con una carcasa de protección, ya que al no hacerlo se produce una excavación sin sostenimiento y se corre el riesgo de que falle. El proceso de excavación empuje se repite hasta llegar al final del trazado de instalación. Por último el cabezal de corte y el taladro son extraídos y la tubería es limpiada removiendo los restos de suelo para así quedar lista para su respectivo uso (ISTT, 2016)

2.4.1. Procedimiento constructivo

Primero se realiza un gran pozo de entrada el cual debe tener las dimensiones suficientes para la instalación del equipo (las medidas generales del pozo de entrada son de 11.50 m de largo y 3.50 m de ancho, la profundidad debe ser 0.80 m mayor que la de la perforación), la tolva para el retiro de escombros y los rieles de entrada. Luego de terminada la excavación, se procede a nivelar en el piso e instalar los rieles de soporte para el equipo.

La perforación se realiza a través del pozo de entrada, la herramienta para perforar es una camisa de acero, la cual en su interior tiene un tornillo helicoidal con una cabeza cortadora cuyos bordes son de corte. La perforación se realiza girando y empujando el tornillo helicoidal para que este se abra paso a través del suelo. Los escombros producto de la perforación son transportados hasta el pozo de recepción por medio del tornillo sin fin, para luego ser retirados por medio de una tolva con una grúa o si la profundidad lo permite, se puede realizar manualmente.

Es obligatorio que la camisa sea de acero, la razón principalmente recae en que al momento de que el tornillo helicoidal gire, este genera un daño potencial a las paredes del encamisado, este debe ser lo suficientemente competente para resistir estos daños.

En la **Figura 18** Sistema de camisa de acero con tornillo sinfín en su interior (Auger Boring) se ilustra el sistema de Auger Boring



Figura 18 Sistema de camisa de acero con tornillo sinfín en su interior (Auger Boring)
Fuente. <http://www.perfocolingenieria.com/auger-boring>

Conforme la punta va avanzando se realiza el acople de tubería. Cuando el tornillo sin fin llega al pozo de recepción se retira y desde el pozo de entrada se realiza la limpieza de la tubería.

El proceso también se puede realizar por medio de un equipo suministrado con el tornillo helicoidal, pero sin estar encamisado. Esta variación del método tiene el problema principal de que la estabilidad de la perforación se puede ver comprometida, adicionalmente es bastante riesgoso para los trabajadores.

2.4.2. Tipos de métodos de Auger Boring

Existen 2 variaciones para esta técnica, la primera es de tipo encarrilada (Track pipe) y la segunda es de tipo soporte (Cradle type).

2.4.2.1. Auger Boring Track Pipe

Los componentes básicos de un sistema de tipo encarrilado son el sistema de orugas, la máquina perforadora, los anillos de acero para envolver la tubería, la

cabeza de corte y los tornillos helicoidales. Los componentes opcionales contienen un sistema de lubricación de la carcasa, un sistema de dirección, un sistema de localización y la carcasa inicial. El dispositivo de conducción y los gatos de empuje suelen estar integrados en la máquina perforadora (Iseley and Gokhale, 1993), el esquema se ilustra en la **Figura 19** Esquema de perforación (Auger Boring).

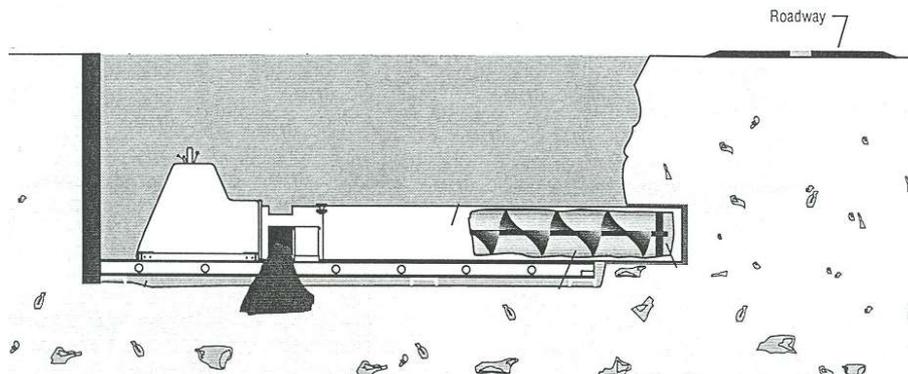


Figura 19 Esquema de perforación (Auger Boring)

Fuente. <http://rebar.ecn.purdue.edu/Trenchless/Pics/AB/AB-Track%20Type%20AB.jpg>

Con el fin de disminuir la fricción entre la camisa de acero y el terreno, es posible lubricarla con lodos de perforación, esto hace que la fuerza de empuje necesaria para el avance de la máquina disminuya. Se debe tener especial cuidado con el ángulo de entrada y a dirección de la cabeza perforadora ya que esta decidirá en gran parte el trazado final.

2.4.2.2. Auger boring Cradle Type

El sistema de tipo soporte funciona por medio de una gran excavación, en la cual no se realiza la instalación de ningún tipo de rieles, el tamaño de la excavación está definido por la longitud de la tubería a instalar ya que en este método no se realizan acoples de tubería, el equipo que genera el giro y el empuje del tornillo helicoidal está sostenido por una grúa, así los escombros producto de la perforación quedan depositados en el fondo del pozo de entrada.

El esquema del Auger Boring Cradle Type se ilustra en la **Figura 20** Esquema técnica Auger Boring Cradle Type.

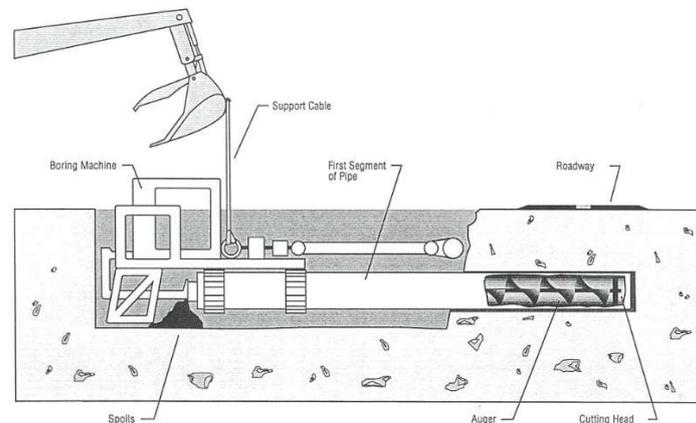


Figura 20 Esquema técnica Auger Boring Cradle Type

Fuente. <http://rebar.ecn.purdue.edu/Trenchless/secondpage/Content/AB.htm>

2.4.3. Equipos

Dentro de la oferta del mercado de la metodología Auger Boring se encontraron 2 equipos. El primero corresponde a un equipo marca Herrenknecht la cual trabaja en todo tipo de terreno y va desde las 4" hasta las 55" de diámetro y se puede consultar en la dirección:

<https://www.herrenknecht.com/en/products/core-products/tunnelling/auger-boring-machines.html>

El segundo equipo corresponde a un equipo marca Robbins, el cual cuenta con capacidad para un diámetro de hasta 84". La limitante en cuanto a la longitud depende del terreno a excavar, pero nunca está por encima de los 180m, su aplicabilidad puede ser consultada en la siguiente dirección:

<http://www.therobbinscompany.com/en/our-products/auger-boring-machines/>

2.4.4. Aplicabilidad

Esta técnica funciona en casi todos los tipos de suelo, pero se debe tener especial cuidado en los suelos muy sueltos o inestables. La razón es que puede suceder que exista un gran retiro de escombros con un bajo avance de la perforación, lo cual indica que se está creando un vacío en el suelo el cual puede generar subsidencias en superficie.

Este método trabaja diámetros variables desde 8" hasta las 82" y se pueden realizar perforaciones de hasta 200 m de longitud, tiene un rendimiento en condiciones normales de 12 m/hora.

2.4.5. Ventajas y desventajas

En la **Tabla 12 Resumen ventajas y desventajas Auger Boring** se presentan las ventajas y desventajas de la metodología

Tabla 12 Resumen ventajas y desventajas Auger Boring

Ventajas	Limitaciones
Eficiente en Roca y suelos Mixtos	No funciona bajo el nivel freático
Método Direccional	Requiere un pozo de entrada grande
Operarios no muy calificados	Longitud máxima 200m
Equipo de corte con poco desgaste	Estudio de redes muy específico
	No se recomienda en diámetros menores a 8"

Fuente. El autor

2.5 Pipe Jacking

En esta metodología, desde un pozo de entrada, por medio de unos gatos hidráulicos, se hace avanzar la tubería y la tuneladora por el terreno. Es un proceso cíclico donde la tubería es empujada hacia adelante, conforme el dispositivo avanza se conecta la tubería sucesivamente hasta llegar al pozo de salida.

El sistema de perforación en el frente de excavación es realizado por medio de una microtuneladora, equipo operado remotamente y la guía es realizada por tecnología láser, permitiendo un monitoreo constante y la realización de ajustes de dirección. La cabeza del equipo tiene la capacidad de deflectarse para lograr los cambios de dirección.

Con el sistema de guía laser, el operario puede conocer en cada momento la ubicación de la tuneladora, lo cual ayuda a que la desviación del eje de diseño sea muy baja. Adicionalmente tiene la capacidad de mantener las presiones en equilibrio con el fin de evitar colapsos.

En la **Figura 21** Tuneladoras se muestran algunas tuneladoras.



Figura 21 Tuneladoras

Fuente. Instituto Colombiano de tecnologías de infraestructura colombiana. Congreso Andesco de servicios públicos y TIC 14º

Al igual que en otras metodologías se puede lubricar la tubería con lodos de perforación, esto con el fin de disminuir la fricción entre la camisa de acero y el terreno, así se logra que la fuerza de empuje necesaria para que el avance de la tubería disminuya.

El retiro de escombros producto de la excavación se realiza por el interior de la tubería que se va instalando, la profundidad mínima recomendada es de 2 m o de 1.5 veces el diámetro de la tubería a instalar.

2.5.1. Procedimiento constructivo

Inicialmente se analiza la zona de trabajo para determinar la distribución del área disponible, procurando acomodar todos los equipos y accesorios necesarios de la forma óptima. Posteriormente se realiza la construcción de los pozos de entrada y salida. Es fundamental la elaboración de un muro de empuje, el cual soportará las cargas transmitidas por el empuje de los gatos hidráulicos, y también se debe considerar la construcción de una losa de fondo. Luego mediante una grúa o una retroexcavadora, la maquina tuneladora es descendida y, junto con los gatos hidráulicos, es ensamblada para empezar la operación.

El avance de la maquina se logra por la rotación del escudo frontal y de la compresión ejercida por la presión de los gatos hidráulicos. Para aplicar la presión de manera correcta en la tubería, se coloca un anillo de empuje el cual distribuye uniformemente la presión. A medida que la perforación avanza, se van introduciendo más secciones de tubería, hasta que la tuneladora logre llegar al pozo de salida. La extracción del material sobrante de la excavación se puede hacer mediante vagones

que los recogen dentro de la tubería que está siendo instalada o transporte hidráulico, por lo cual es necesario el uso de la inyección de agua o bentonita, un sistema de bombeo y un sistema de decantación que permita la separación del material con el fluido para que este último pueda ser reutilizado (Molano Garay 2017).

El procedimiento se ilustra en la **Figura 22** Procedimiento Pipe Jacking

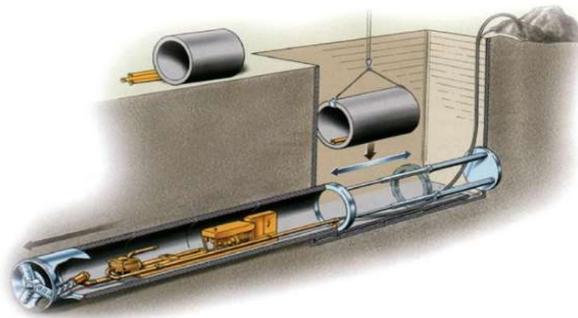


Figura 22 Procedimiento Pipe Jacking

Fuente. Instituto Colombiano de tecnologías de infraestructura colombiana. Congreso Andesco de servicios públicos y TIC 14º

2.5.2. Tipos de Pipe Jacking

Dentro de este tipo de tecnología se pueden identificar varios tipos, los cuales difieren principalmente, por la tecnología que realiza la contención en el frente de excavación.

2.5.2.1. Microtuneladora de presión de tierras (EPB)

Este tipo de tuneladora logra la excavación del terreno por medio de una cabeza rotativa que tiene los elementos de corte, la cual es empujada contra el frente de excavación y realiza el proceso de excavar y extraer el material. El suelo entra en una cámara de excavación a través de las aberturas en la cara frontal, y dentro de la cabeza de corte, unas aspas mezclan el material hasta que este obtiene la textura requerida. Esta pasta es presionada dentro de la cabeza de corte con el fin de igualarla a la presión del suelo circundante y del agua subterránea.

Posteriormente un tornillo helicoidal, transporta el material excavado de la base de la cabeza de excavación hasta una banda transportadora, La interacción entre el rendimiento del transportador del tornillo sinfín y la velocidad de avance del TBM

aseguran que la presión de soporte de la pasta del suelo pueda ser controlada con precisión. El equilibrio en la cabeza de excavación es monitoreado continuamente usando sensores de presión de tierra. De esta manera, el operador es capaz de afinar todos los parámetros de túnel entre sí, incluso bajo condiciones geológicas cambiantes, permitiendo altas velocidades de avance y minimizando el riesgo de levantamiento o asentamiento en la superficie.

No todas las condiciones del terreno tienen características ideales para el túnel EPB en su estado natural. Sin embargo, el rango de aplicación de este método se puede mejorar enormemente por el acondicionamiento del suelo. Esto significa cambiar la plasticidad, la textura y la permeabilidad al agua del suelo inyectando diversos materiales acondicionadores como agua, bentonita o espuma. Esto permite que los escudos EPB alcancen buenas velocidades de avance incluso en suelos heterogéneos que contienen grava, arena o agua, o en condiciones geológicas inestables.

Este tipo de perforación no controla la presión en la punta de la perforación, por lo tanto, es necesario variar la fuerza de empuje y la velocidad del tornillo helicoidal para controlar la presión de tierras; cuando se está excavando un material con baja plasticidad (o que se dificulte su extracción). Este método es ideal para terrenos blandos, estables y arcillas cohesivas.

El esquema de la tuneladora EPB se presenta en la **Figura 23** Microtuneladora de presión de tierras EPB

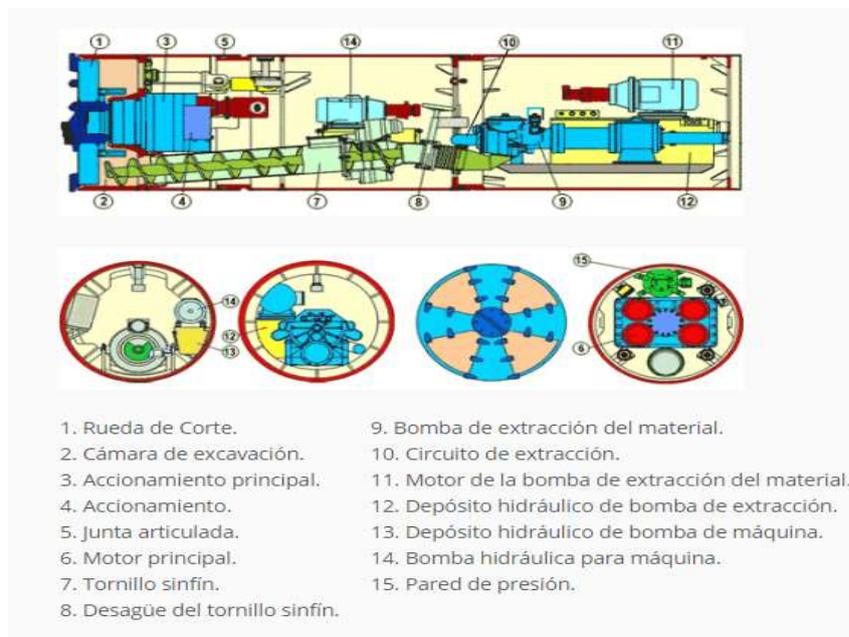


Figura 23 Microtuneladora de presión de tierras EPB

Fuente. <http://www.microtunnel.com/es/la-hinca-de-tuberia/micro-epb>

La ventaja especial de escudo de presión de tierras es su extrema flexibilidad. Una serie de desarrollos han mejorado enormemente el rango de aplicación de este método. Con los tornillos helicoidales convencionales, no es posible construir un tapón de tierra suficiente para mantener la presión de soporte en suelos cohesivos con una presión de agua aumentada. Tales suelos, sin embargo, pueden ser controlados de forma segura usando bombas de pistón. Las bombas de pistón sellan completamente el sistema detrás del tornillo, manteniendo así el nivel de presión en la cara del túnel.

Esta metodología puede realizar tramos hasta de 1.300 m de longitud (en suelos como los de Bogotá), diámetros por encima de 100", y por debajo del nivel freático.

2.5.2.2. Microtuneladora de presión de lodos (AVN)

La microtuneladora de presión de lodos está entre las máquinas de perforación de túnel técnicamente más sofisticadas. En el frente de excavación cuenta con un cabezal hermético en el que se mezcla el suelo excavado con lodo bentónico. El balance de presiones se realiza controlando la presión en punta por medio de un sistema de bombeo. Bajo condiciones geológicas estables estos equipos permiten la construcción de túneles, con rendimientos muy altos. Esta potente tecnología es por lo tanto aplicable para la excavación de túneles largos.

En el proceso de tunelado, un cabezal giratorio de corte se presiona contra la cara del túnel. El material retirado pasa por un sistema de separación de sólidos, el cual permite reciclar el lodo para reutilizarlo en el proceso.

El esquema de la microtuneladora de presión de lodos se presenta en la **Figura 24**



Figura 24 Microtuneladora de presión de lodos (AVN)

Fuente. <http://www.microtunnel.com/es/la-hinca-de-tuberia/micro-hidroescudo/>

2.5.3. Equipos

Existen muchos fabricantes de máquinas EPB y AVN, para un amplio rango de suelos, diámetros y distancias. Un ejemplo se puede consultar en las siguientes direcciones:

www.herrenknecht.com/en/products/core-products/tunnelling/epb-shield.html

www.herrenknecht.com/en/products/core-products/tunnelling/avn-machine.html

Es de anotar la existencia de equipos como el direct pipe, el cual es apto para terrenos rocosos, suelos blandos y emplea diámetros de hasta 60", y constituye un híbrido entre AVN y HDD. El equipo se puede consultar en la siguiente dirección:

www.herrenknecht.com/en/products/core-products/tunnelling/direct-pipe.html

2.5.4. Aplicabilidad

El tipo de suelo tiene un efecto muy importante en la selección del tipo de tuneladora a utilizar y al tipo de contención requerida para garantizar la estabilidad de la perforación.

En cuanto a la longitud, se debe tener en cuenta la potencia de los gatos hidráulicos a utilizar, la relación entre la potencia requerida, y el diámetro de la perforación multiplicado por la longitud es aproximadamente proporcional. A mayor diámetro de la tubería la superficie de contacto con el terreno es mayor y por ende la fricción aumenta. Como la tubería es empujada desde el foso de ataque requerirá una mayor potencia de empuje para una tubería de mayor diámetro en una misma longitud. De igual manera, para un mismo equipo en dos diámetros diferentes la capacidad final de longitud de instalación será menor para la tubería de mayor diámetro.

El diámetro mínimo es de 20" para AVN y 50" para EPB, pero dependerá directamente del tipo de equipo a utilizar y de que todos sus complementos y aditamentos adicionales quepan en el túnel.

El diámetro máximo en técnicas de Pipe Jacking no resulta solamente de consideraciones de potencia de empuje, sino que se debe considerar la competitividad del sistema, comparado con tuneladoras de dovelas. Al momento de la instalación la tubería, esta se ve sometida a esfuerzos de compresión causados por el empuje de los gatos hidráulicos. A mayor diámetro y longitud, los esfuerzos requeridos son mucho mayores, lo que se ve representado en que la pared de la tubería tendrá un mayor espesor. Cuando el espesor se vuelve demasiado grande, la tubería deja de ser competitiva en comparación con las dovelas en concreto cuyo

espesor se rige en buena parte por lo que requiere la contención misma de la excavación. Por lo tanto, no se recomienda el Pipe Jacking para diámetros superiores a las 120”.

En la **Tabla 13** Aplicabilidad del Pipe Jacking se resume la aplicabilidad de las tecnologías de Pipe Jacking.

Tabla 13 Aplicabilidad del Pipe Jacking

Parámetro	EPB	AVN
Roca dura	No	Posible
Roca blanda	No	Si
Arcilla dura	Si	Si
Suelos blandos	Si	Si
Arenas y gravas	Posible	Si
Arenas	Posible	Si
Debajo del nivel freático	Si	Si

Fuente. El autor

2.5.5. Ventajas y desventajas

En la **Tabla 14** se presentan las ventajas y desventajas de la metodología.

Tabla 14 Resumen ventajas y desventajas de la microtunelería Pipe Jacking

Ventajas	Desventajas
Eficiente en Roca y suelos Mixtos	Se debe tener cuidado con la aplicabilidad del diámetro
Método Direccionable	Requiere pozos grandes
Largas distancias	Costos elevados
Equipo de corte con poco desgaste	

Fuente. El autor

Capítulo 3 Tipos de tubería para tecnologías sin zanja

Las tuberías disponibles para la conducción de agua potable deben ser resistentes a la presión de trabajo interna determinada por el diseñador, deben garantizar hermeticidad impidiendo la infiltración, deben presentar una alta resistencia al aplastamiento, alta resistencia dinámica y deben presentar un óptimo comportamiento hidráulico.

De acuerdo con lo anterior, para redes de acueducto instaladas por medio de tecnologías sin zanja están fabricadas en diferentes materiales como concreto (la tubería en concreto se puede usar como revestimiento para la perforación), acero, PAD y GRP. Para identificar la tubería a utilizar se deben identificar las características de cada una de ellas, de estas características depende tanto el funcionamiento final de la tubería como la posible utilización en una u otra metodología.

Para efectos del presente trabajo se analizarán las siguientes características:

- Material
- Longitud de cada tubería
- Diámetros comerciales

3.1 Tubería GRP poliéster reforzado con fibra de vidrio

La tubería GRP es una tubería construida en resinas de alta resistencia química y mecánica con refuerzos en fibra de vidrio que proporcionan una alta rigidez, las paredes de la tubería están compuestas por 3 capas unidas entre sí.

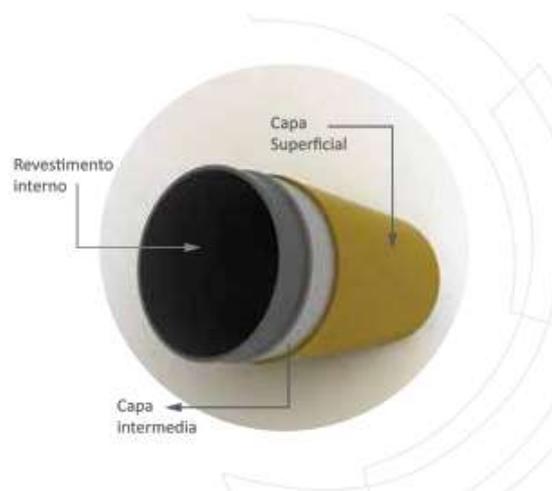


Figura 25 Composición de las paredes de la tubería GRP

Fuente. Manual técnico GRP pavco

La composición de las capas es la siguiente:

- Capa externa (superficial): Tiene un espesor entre 0,2 mm y 0,3 mm, la cual está hecha de resina sin o con refuerzo de vidrio. Garantiza una completa impregnación de las fibras periféricas, logrando que la superficie externa de los tubos se encuentre totalmente libre de fibras salientes, obteniendo un buen acabado externo. Esta capa proporciona resistencia a condiciones ambientales a las cuales estará sometida la tubería. (Manual técnico GRP Pavco)
- Capa intermedia (resistencia mecánica): Su función es brindar resistencia a las paredes de los tubos ante el esfuerzo que causan las condiciones de diseño (el esfuerzo debido a la presión interna y/o externa, y esfuerzos generados por cargas externas). La capa mecánica está compuesta por fibra de vidrio, resina y arena. (Manual técnico GRP Pavco)
- Capa interna (revestimiento): Esta se encuentra en contacto directo con el fluido y brinda máxima resistencia ante el ataque químico del fluido mismo. Además, esta capa presenta una superficie interna particularmente suave. La capa está compuesta por fibra de vidrio y resina. El espesor de revestimiento estándar está entre 0,8 y 1,2 mm. (Manual técnico GRP Pavco)

Este tipo de tubería presenta una alta resistencia mecánica debido a la composición de su capa intermedia, esto le permite a la tubería ser hincada de manera dinámica en el terreno, aun así, la tubería tiene un peso muy bajo, este peso oscila entre 1/10 del peso de tuberías en concreto y 1/4 del peso de la tubería de acero.

También se puede anotar que la tubería tiene una baja rugosidad de la pared interna, esto quiere decir que las pérdidas por fricción son bajas, lo que repercute en menor energía de bombeo, menores costos operacionales y menores costos de limpieza.

En cuanto a las uniones de la tubería, estas cuentan con empaques elastoméricos los cuales son a prueba de fugas y de bajo tiempo de instalación, también pueden ser fabricados diversos tipos de accesorios con cualquier tipo de forma.

La vida útil de este material es muy larga puesto que cuenta con resistencia a agentes químicos, lo que hace que no necesite mantenimiento ni sufra ningún tipo de deterioro durante el tiempo de servicio.

3.2 Tubería en acero

Son tuberías cuya gran ventaja radica en su resistencia, son tuberías con gran resistencia a la tensión, a la flexión y tiene una gran flexibilidad antes de fallar, son tuberías capaces de soportar grandes cargas de aplastamiento las cuales pueden

ser causadas por movimientos sísmicos o por grandes capas de relleno, poseen una gran resistencia a la corrosión y a golpes mecánicos de impacto, por lo que es menos vulnerable a sufrir daños por condiciones anormales de servicio. Son ideales para trabajar en condiciones de suelo poco estable.

Este tipo de tubería tiene una gran resistencia a reventarse, es decir que puede ser utilizado en redes con altas presiones de trabajo.

En cuanto a la funcionalidad este tipo de tubería cuenta con una gran cantidad de accesorios y uniones para todas las aplicaciones, durante el tiempo de trabajo no requiere mantenimiento y tiene una vida útil de hasta 150 años.

Cabe mencionar que generalmente los diámetros interiores son más grandes que los diámetros interiores nominales de otros materiales, esto se ve representado en mayor capacidad de conductividad de flujo, esto combinado con un acabado interno liso significa menores costos de bombeo y ahorros importantes de energía durante el período de trabajo.

3.3 Tubería PEAD

La tubería PEAD es una tubería fabricada en polietileno de alta densidad, siendo este un material termoplástico obtenido de la polimerización del etileno e insoluble en todos los solventes orgánicos e inorgánicos.

La fabricación de tubería es realizada por medio de un proceso de extrusión en la que el material caliente es forzado a entrar por una boquilla, luego de esta boquilla, el material entra a un molde en donde por medio de aire a presión toma la forma del molde formando así el tubo para posteriormente pasar a la etapa de enfriado.

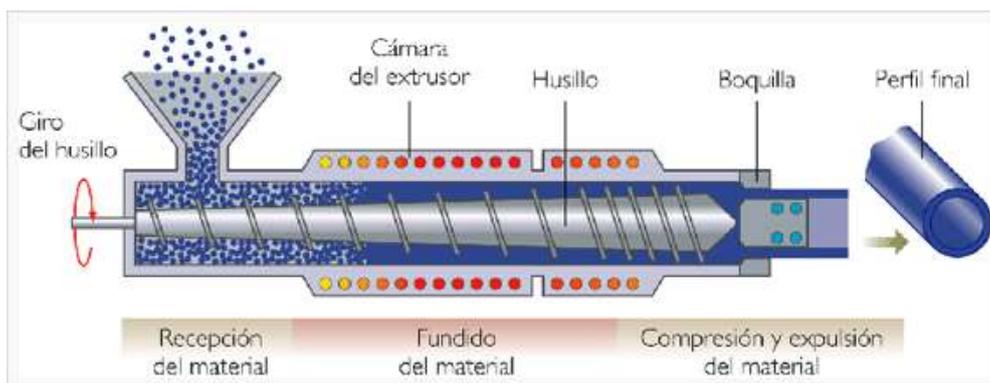


Figura 26 Proceso fabricación de tubería PEAD

Fuente. <http://www.tecnologia-informatica.es/metodos-para-fabricar-plasticos/>

La tubería PEAD es ideal para terrenos de alta sinuosidad esto dado su flexibilidad y alta resistencia, dentro de las ventajas de este tipo de tubería sobresale la longitud de los tramos de instalación, la tubería PEAD viene en rollos de 100 m de longitud en lugar de tramos de 6 o 12 metros como las demás tuberías.

A pesar de ser una tubería muy liviana en cuestión de funcionamiento es resistente a golpes, cambios de temperatura y posee una gran resistencia a agentes químicos; el tiempo de vida útil de la tubería es de más de 50 años y cuenta con la gran ventaja de tener menos juntas que los demás tipos de tuberías.

Asimismo, las paredes internas de la tubería son lisas lo que dificulta la formación de depósitos e incrustaciones o adherencias; otra de las ventajas de la tubería es su alta resistencia a la abrasión, dicha abrasión puede venir de partículas sólidas en el interior de la tubería.

3.4 Tubería en concreto reforzado

Los tubos en concreto están contruidos en concreto de mezclas secas, con una baja relación agua cemento, alta densidad, baja absorción y baja permeabilidad, están reforzados helicoidalmente con varillas de acero, son tubos que se ensamblan por uniones tipo campana y espigo.

Los tubos en concreto reforzado son contruidos con una armadura en acero la cual es fabricada con máquinas de electrosoldadura, el concreto es vaciado por medio de tolvas a la maquinas moldeadoras, las cuales se encargan de dar la forma final al tubo, en la actualidad se usan principalmente 3 tipos de máquinas:

- Prensas vibrocompactadoras
- Máquinas de compresión radial
- Maquinas combinadas

Las prensas vibrocompactadoras son equipos que constan de un eje central y un molde exterior, la diferencia de diámetros entre el molde exterior y el eje central define el espesor de la tubería.



Figura 27 Equipo de prensa vibrocompactadora
Fuente. <https://www.youtube.com/watch?v=3b2e4FizRUg>

El acero de refuerzo es ubicado en el molde y posteriormente se procede al llenado del mismo con concreto, de manera directa y alimentado por medio de una banda transportadora.



Figura 28 Llenado de prensa vibrocompactadora
Fuente. <https://www.youtube.com/watch?v=3b2e4FizRUg>

Una vez es llenado el molde se procede a compactarlo con un anillo que es accionado por medio de una presa hidráulica. Posteriormente se procede a vibrar el concreto, esta vibración se realiza por medio del eje interno de la formaleta.



Figura 29 Compactación de prensa vibrocompactadora
Fuente. <https://www.youtube.com/watch?v=3b2e4FizRUg>

Inmediatamente el molde es retirado y el tubo transportado al sitio de fraguado. Este tipo de equipo de fabricación garantiza espesores de pared uniformes en toda la longitud con un acabado interiores bastante liso.



Figura 30 Retiro de la tubería de prensa vibrocompactadora
Fuente. <https://www.youtube.com/watch?v=3b2e4FizRUg>

Las máquinas de compresión radial son equipos compuestos por un molde exterior, un cabezal interno y un eje rotatorio. El material es dispuesto de manera directa en el molde exterior, posteriormente el eje rotatorio ingresa en la mezcla y junto con el cabezal interno giran dando así forma a la tubería.



Figura 31 Equipo de compresión radial

Fuente. <https://www.youtube.com/watch?v=UWCvKAphP1w>

La tubería es desmoldada en fresco y transportada al sitio de acopio, este método cuenta con la ventaja de que al estar totalmente encofrados los tubos es poco probable que se produzcan deformaciones durante el proceso de fabricación.

En cuestiones de funcionamiento la tubería en concreto presenta unas excelentes propiedades mecánicas y pueden ser instaladas bajo cualquier condición de carga, pueden ser hincados o instalados en zanjas o terraplenes. Es necesario mencionar que la tubería en concreto tiene resistencia al fuego y no se deteriora en exposición directa a los rayos ultravioleta en casos de almacenamiento a la intemperie.

Capítulo 4 Elaboración de metodología de análisis de aplicabilidad de las tecnologías sin zanja

4.1 Factores generales para cada metodología

Luego de revisadas las tecnologías sin zanja aplicables a la instalación de tubería de agua potable para cruces subfluviales, se definieron las posibles condiciones que tienen las diferentes metodologías. Estas condiciones son únicas para cada proyecto. A continuación, se exponen las diferentes condiciones:

- Condiciones del terreno
- Longitud del cruce
- Condiciones finales de la tubería instalada
- Proximidad de otras instalaciones
- Diámetro de la perforación
- Protección de la perforación y la tubería
- Potenciales movimientos del suelo
- Espacio de trabajo necesario
- Tolerancias (alineación e inclinación)
- Limitaciones en tiempo de ejecución
- Profundidad de localización
- Tipo de tubería
- Costos y riesgos

4.1.1 Condiciones de terreno

Las condiciones del terreno hacen referencia principalmente al tipo de suelo que se encuentra en el lugar donde se va a realizar el proyecto. Se debe tener en cuenta las características del suelo tales como cohesión, densidad, grado de perturbación, granulometría y compacidad, ya que como lo vimos anteriormente la escogencia del método depende principalmente de la granulometría.

Adicionalmente se deben considerar factores particulares tales como niveles, taludes cercanos, asentamientos, zonas plásticas, etc.

4.1.2 Longitud del cruce

La longitud del cruce se refiere únicamente a la longitud del cruce subfluvial. Es de saber que cada método tiene limitaciones en cuanto a la longitud máxima en la cual funciona, la longitud del cruce es única y específica para cada proyecto en particular.

Al momento de calcularla se debe tener en cuenta el área inundable del río, los sobre anchos y los posibles cambios en el cauce.

4.1.3 Condiciones finales de la tubería instalada

Se deben garantizar las condiciones establecidas en los diseños en cuanto a presiones de trabajo, resistencia al impacto, rigidez y resistencia al aplastamiento transversal.

4.1.4 Proximidad a otras instalaciones

El estudio de la proximidad a otras instalaciones se realiza con el fin de prevenir daños a tuberías previamente instaladas o a construcciones adyacentes, esto con el fin de evitar fenómenos como subsidencias sin afectar a las personas ni a la propiedad ajena.

4.1.5 Diámetro de la perforación

El diámetro de la perforación es una variable dependiente de cada proyecto. El valor del diámetro a emplear depende directamente de la longitud de la conducción, caudal a transportar y las pérdidas de cada proyecto.

4.1.6 Potenciales movimientos de los suelos

Se deben realizar un diagnóstico del estado de los taludes adyacentes a la zona de obra, este diagnóstico debe estimar la intensidad de los daños que pudiera generar un talud y las obras de contención que pudieren ser necesarias.

4.1.7 Espacio de trabajo necesario

Esta condición hace referencia a condiciones de espacio en superficie, algunas metodologías requieren espacios más generosos en superficie con el fin de instalar equipos o construir placas de soporte para los mismos, en algunos casos es necesario empalmar la tubería en superficie, lo cual requiere considerablemente más espacio.

4.1.8 Tolerancias (alineación e inclinación)

Esta condición depende del diseño hidráulico del proyecto y hace referencia a la nivelación de todos los tramos de tubería, el chequeo de pendientes y el error máximo en cotas de batea.

4.1.9 Limitaciones en tiempos de ejecución

Esta condición aplica para proyectos de corta duración los cuales tienen gran limitación en su tiempo de ejecución, esto puede aplicar para la construcción de redes indispensables o el cambio de redes existentes, es de saber que algunos métodos tienen rendimientos mejores a otros.

4.1.10 Tipo de tubería

El tipo de tubería y camisa puede variar según la necesidad específica de cada proyecto y no todos los tipos de tubería aplican para todas las metodologías. Los materiales y los diámetros disponibles varían según los diámetros; se analizará más a fondo a continuación.

4.1.11 Costos y riesgos

Para todos los casos se debe contemplar el factor financiero del proyecto, esto incluye la revisión de la correcta elección de equipos, evaluar si existe sobredimensionamiento de los elementos, inadecuadas especificaciones técnicas y cualquier otro factor que pueda incrementar el presupuesto. Al momento de realizar el análisis de costos, siempre se deben revisar los riesgos asociados al mismo

4.2 Escogencia de factores

Con el fin de simplificar la selección del método más idóneo, se realizó una comparación entre 3 factores específicos, los cuales son decisivos para la escogencia de cada tecnología.

Es decir, cuando nos encontramos con la necesidad de realizar un cruce subfluvial, existen algunas condiciones inmodificables que son inherentes al proyecto y cuya definición no depende de nosotros; en primer lugar porque se encuentra la condición del terreno, variable inmodificable puesto que el terreno que tengamos en campo está presente y el considerar la generación de un reemplazo de terreno bajo un río es tanto técnica como económicamente inviable, la segunda condición se da porque corresponde a la longitud de la perforación, la cual tampoco es modificable puesto

que el ancho del río depende de su morfología; finalmente nos encontramos con el diámetro de la conducción, condición por la cual parte el proyecto donde se evidencia que no tendría sentido instalar una tubería de 10" cuando la necesidad del acueducto corresponde a 60".

En este sentido y con el fin de simplificar la selección del método más idóneo se realizó una comparación entre estas 3 variables específicas las cuales son únicas para cada situación siendo inmodificables para la elaboración del cruce subfluvial; y pueden llegar a restringir la utilización de cada metodología.

4.2.1 Condiciones de terreno

La primera variable es la condición del terreno y específicamente la granulometría, esto se hace basándose en que el porcentaje de gravas en el terreno es un factor limitante de cada metodología, si bien es cierto que la gran mayoría de los métodos funcionan en arenas poco gravosas y en arcillas blandas y duras. Su comportamiento en arenas gravosas y rocas no es aceptable en todos los métodos.

El problema principal con las gravas es la falta de cohesión. En este tipo de suelos ocurre un fenómeno que, dada la falta de cohesión al momento de introducir el varillaje en el suelo, los elementos se desplazan, pero al retirarlo los elementos rápidamente llenan el espacio previamente ocupado por el varillaje, ocasionando problemas de estabilidad en el frente de trabajo y a su vez dificultando el proceso de perforación. Además, este tipo de suelo limita el uso de los lodos de perforación, la limitante consta en que algunas partículas son muy grandes y no salen por flotación.

4.2.2 Diámetro de la perforación

El diámetro de la perforación es un parámetro excluyente al tomar la decisión de la metodología a utilizar, esto a razón de que, al momento de seleccionar un equipo, este debe ser acorde al diámetro de tubería a instalar, cada equipo tiene una limitante en capacidad de perforación de acuerdo con el diámetro a utilizar. Un mismo equipo puede realizar perforaciones de 500m en un diámetro pequeño, pero solo 200m en el diámetro máximo de su capacidad. Adicionalmente las diferentes técnicas varían de acuerdo con el diámetro a utilizar.

4.2.3 Longitud de la perforación

Se tomó esta variable como referencia porque es el valor menos constante en los diseños de cruces subfluviales. Como se mencionó anteriormente es intrínseco de cada proyecto siendo un factor limitante al momento de escoger una técnica de trabajo. La variabilidad de técnicas en este sentido no solo depende del tamaño y de la capacidad del equipo (como en el diámetro), sino que además depende de la capacidad de retiro de escombros y de transmitir la fuerza al frente de la perforación.

4.3 Construcción de tablas de aplicabilidad

Luego de realizada la revisión de los alcances reales de cada metodología en cuanto a las 3 condiciones previamente escogidas (condiciones del terreno, longitud de la tubería y diámetro), se continuó con la elaboración de 3 tablas que consolidan esta información.

Cada una de estas tablas corresponde a una condición y define la aplicabilidad o no de la metodología en cada condición. Las tablas generadas tienen la siguiente estructura:

Tabla 15 Estructura de las tablas de condiciones

Condición (G%, Diámetro, Longitud)	Metodología A	Metodología B	ETC.
Rango (% , ϕ" , M) Desde - Hasta	Aplicabilidad (Si, No, Posible)	Aplicabilidad (Si, No, Posible)	Aplicabilidad (Si, No, Posible)

Fuente. El autor

La primera casilla de la primera fila de izquierda a derecha identifica la condición a la que corresponde la tabla, de la segunda casilla en adelante va nombrada cada metodología; la primera columna corresponderá al rango de valores que condicionan la aplicabilidad, la forma del rango será "desde – hasta" por ejemplo en la tabla de los diámetros encontraremos el rango 10" – 20", lo quiere decir que la aplicabilidad contempla los rangos de diámetros comprendidos entre las 10" y las 20", las siguientes columnas corresponden al resultado de la aplicabilidad de cada metodología y el resultado será " Si, No, Posible", los resultados Si y No significan la aplicabilidad, el resultado "Posible" corresponderá a situaciones en las que aplica la metodología pero con restricciones, estas restricciones puede obedecer a aditamentos especiales de los equipos o a restricciones correspondientes a otra condición, por ejemplo en algunas metodologías las longitudes más largas no se pueden realizar con el máximo diámetro del equipo.

Tabla 16 Aplicabilidad de las metodologías en base al diámetro de la perforación

Diámetro	Perforación horizontal dirigida			Compactación de suelo	Pipe Ramming	Auger boring	Pipe Jacking	
	Mini HDD	Midi HDD	Maxi HDD				EPB	AVN
< 4"	No	No	No	Si	No	No	No	No
4"	Si	No	No	Si	Si	Si	No	No
8"	Si	No	No	Si	Si	Si	No	No
10" - 30"	Si	Si	No	No	Si	Si	No	Posible
31" - 50"	No	Si	No	No	Si	Si	No	Si
51" - 70"	No	Si	Si	No	Si	Si	Posible	Si
71" - 80"	No	No	Si	No	Si	Si	Si	Si
81" - 120"	No	No	No	No	Si	No	Si	Si
> 120"	No	No	No	No	No	No	Si	Si

Fuente. El autor

Tabla 17 Aplicabilidad de las metodologías en base a la longitud de la perforación

Longitud	Perforación horizontal dirigida			Compactación de suelo	Pipe Ramming	Auger boring	Pipe Jacking	
	Mini HDD	Midi HDD	Maxi HDD				EPB	AVN
< 50 m	Si	No	No	Si	Si	Si	Si	Si
50 m - 100 m	Si	No	No	No	Si	Si	Si	Si
101 m - 200 m	Si	No	No	No	No	Si	Si	Si
200 m - 500 m	Si	Si	No	No	No	No	Si	Si
501 m - 600 m	No	Si	No	No	No	No	Si	Si
601 m - 1000 m	No	Si	Si	No	No	No	Si	Si
1001m - 1500 m	No	No	Si	No	No	No	Posible	Posible
1501 m - 2000 m	No	No	Si	No	No	No	No	No
> 2000	No	No	Si	No	No	No	No	No

Fuente. El autor

Tabla 18 Aplicabilidad de las metodologías en base al tipo de suelo

%G	Parámetro	Perforación horizontal dirigida			Compactación de suelo	Pipe Ramming	Auger boring	Pipe Jacking	
		Mini HDD	Midi HDD	Maxi HDD				EPB	AVN
	Roca dura	No	Posible	Posible	No	No	Posible	Posible	Posible
	Roca blanda	Posible	Posible	Posible	No	No	Posible	Posible	Posible
100	Gravas	No	No	No	No	Si	Posible	No	Posible
70	Arena gravosa	No	No	No	Posible	Si	Si	No	Si
35	Arena poco gravosa	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si
	Arcilla dura	Si	Si	Si	Posible	Si	Si	Si	No
	Arcilla blanda	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	No
	Debajo del nivel freático	Si	Si	Si	Posible	Posible	Posible	Si	Si

Fuente. El autor

4.4 Construcción de gráficas de aplicabilidad

Con el fin de hacer más fácil la elección de la metodología, se generaron gráficas para consolidar la información, cada una de estas, muestra la clasificación de suelos en base a su granulometría; posteriormente se colocaron en las abscisas los diferentes diámetros posibles de trabajo, así como en las ordenadas se ubicaron las longitudes a cruzar.

En las ordenadas se ubicaron longitudes desde los 50 m hasta los 2500 m según las limitantes típicas de cada método, y en las abscisas se trabajó con rangos de diámetro desde las 4" hasta las 120" respectivamente.

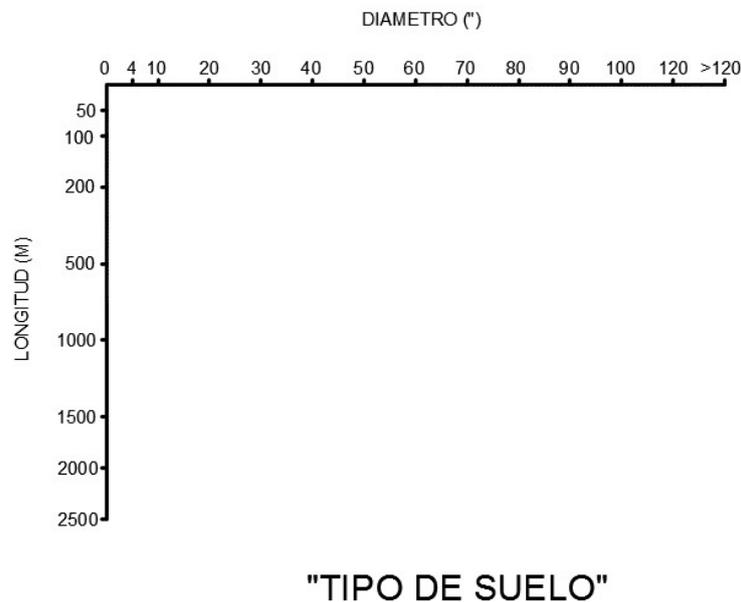


Figura 32 Gráfica base para la metodología

Fuente. El autor

Posteriormente se marcó el rango de aplicabilidad de cada método, cubriendo las zonas en donde funciona la técnica.

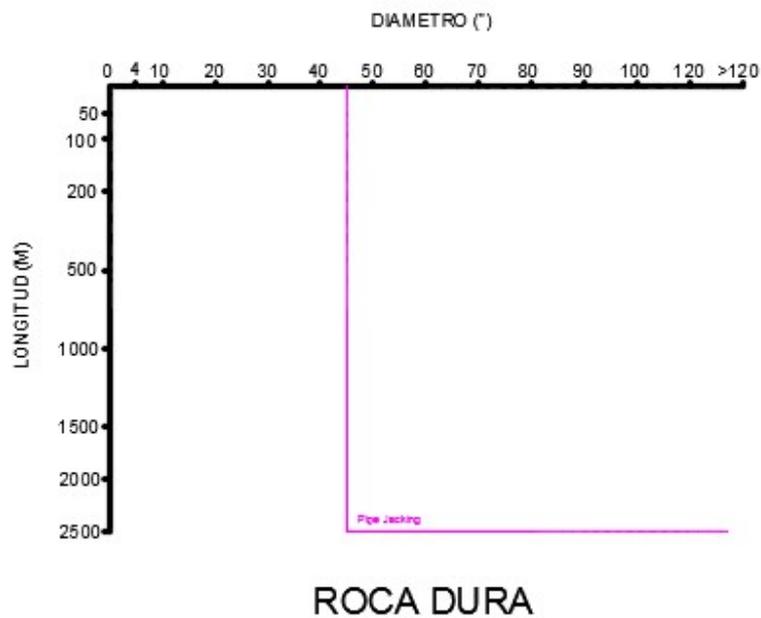


Figura 33 Gráfica aplicabilidad de Pipe Jacking en roca dura
 Fuente. El autor

Para el ejemplo del Pipe Jacking en roca dura es aplicable para longitudes hasta de 2500 m pero en diámetros de 45" en adelante. Al adicionar las técnicas aplicables para roca dura el gráfico tendría la siguiente forma:

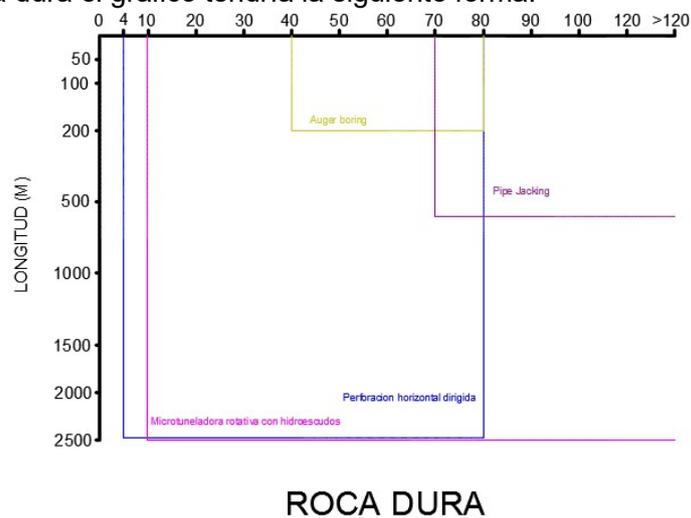


Figura 34 Gráfica aplicabilidad de tecnologías sin zanja en roca dura
 Fuente. El autor

En la **Figura 34** se puede ver la aplicabilidad de los métodos para roca dura y a su vez el rango de longitudes y diámetros aplicables. Por supuesto los métodos que no son aplicables a este tipo de suelo no aparecen en la gráfica.

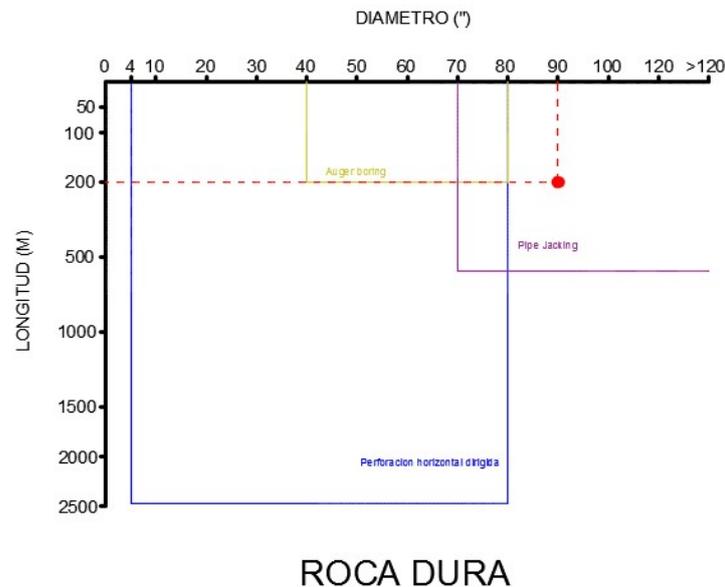


Figura 35 Ejemplo aplicabilidad de la metodología
Fuente. El autor

En el caso de la **Figura 35**, si estuviéramos en roca dura para un cruce con una longitud de 200 m y un diámetro de 90" se aplicaría la tecnología de Pipe Jacking.

Las gráficas completas con los rangos más altos de diámetros y longitudes para cada tipo de material se presentan a título informativo en el **Anexo 1**. En el **Capítulo 4.5** se analizará la limitación de las gráficas para su uso en cruces subfluviales.

4.5 Construcción de las gráficas para los cruces subfluviales

Las gráficas anteriormente expuestas comparan la aplicabilidad de las metodologías con respecto a las longitudes, diámetros y tipos de suelo. Sin embargo, con el fin de tener gráficas más adecuadas para el objetivo de la presente tesis se adaptaron estas a las condiciones en Colombia. Esta adaptación corresponde a condiciones reales de los anchos de los ríos en nuestro país y a los diámetros utilizados para tuberías de acueductos.

Adicionalmente se analizan características limitantes de las metodologías, esto con el fin de realizar un mejor ajuste.

4.5.1 Evaluación de los diámetros.

Con el fin de limitar el diámetro máximo para un tubo madre de acueducto en Colombia se realizó la búsqueda de las ciudades más pobladas de Colombia

Tabla 19 Ciudades más pobladas de Colombia

CIUDAD	POBLACIÓN	DIÁMETRO TUBO ACUEDUCTO
Bogotá:	7.674.366.	72" Tibitoc
Medellín: (Antioquia)	2.417.325	40"
Cali: (Valle del Cauca)	2.319.684	58" Rio Cali
Barranquilla: (Atlántico)	1.206.946	42" Rio Magdalena
Cartagena: (Bolívar)	978.600	40" Albornoz
Cúcuta: (N. de Santander)	637.302	48" Zulia
Ibagué: (Tolima)	542.876	36" Cocora

Fuente: El autor.

Se encontró como la ciudad más poblada de Colombia: Bogotá, lo cual indica que es la ciudad con mayor demanda de agua potable del país, lo que a su vez se deduce con el sistema de acueducto más grande del país; según la empresa de acueducto y alcantarillado de Bogotá el tubo madre de mayor diámetro es el de Tibitoc que tiene un diámetro de 78". Este diámetro fue posteriormente reducido a 72" por un recubrimiento realizado a la tubería. El segundo tubo madre más grande del país es el del acueducto de Cali el cual tiene un diámetro de 58".

Se usará un diámetro de 60" siendo el máximo y el mayor posible, ya que Tibitoc es un caso excepcional en el país dado que Bogotá tiene más del doble de habitantes que Medellín y Cali que son la segunda y tercera ciudad con mayor número de habitantes. Por lo tanto, es poco probable que en los próximos años se proyecte una tubería de acueducto para un cruce subfluvial con un diámetro mayor al máximo posible estipulado para este trabajo.

4.5.2 Evaluación de los anchos de los ríos.

Se realizó una búsqueda de los anchos de los ríos en Colombia y se encontró que no existe una base de datos definida, el único estudio cercano que se encontró fue un análisis realizado por la superintendencia de transporte, en donde recolectaron

unos anchos para los ríos, pero no publicaron los anexos del estudio, por lo tanto, no fue posible acceder a esta información.

Para tener un dato aproximado de los anchos, se realizó una búsqueda aérea por medio de mapas y se prosiguió a tomar las medidas de las partes más anchas de los principales ríos de Colombia.

Se tomaron 2 referencias por río y se prosiguió a medirlo en el mapa con la herramienta de Google Maps, se debe tener en cuenta que las medidas tomadas de esta manera son aproximaciones, estas fueron tomadas para tener un orden de magnitud de los anchos de los ríos. Ver **Figura 36** Ejemplo de medida en Río Sinú.

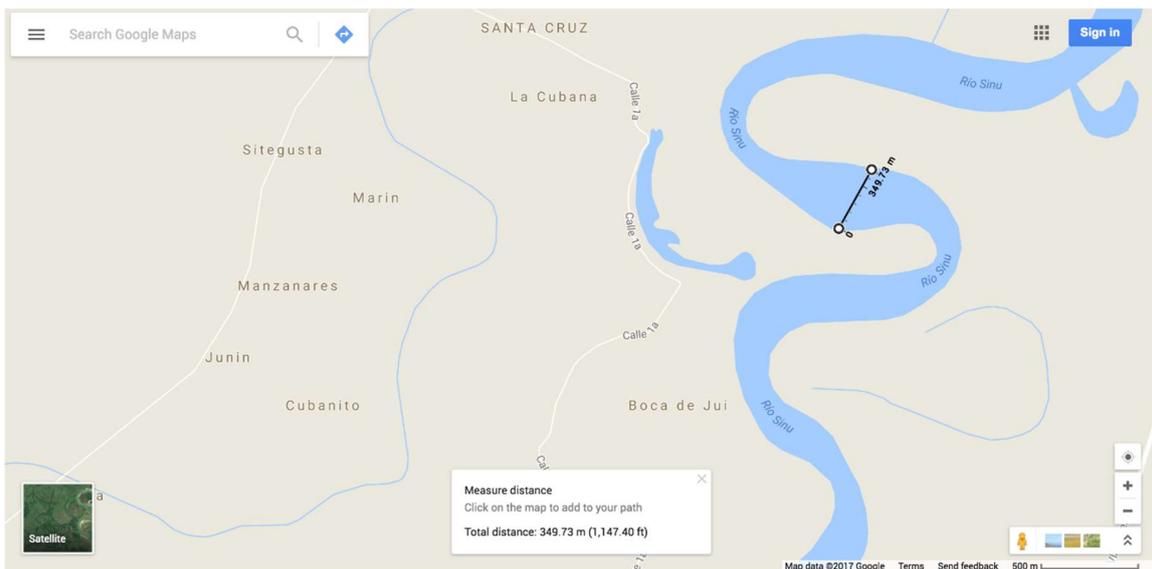


Figura 36 Ejemplo de medida en Río Sinú
Fuente. El Autor

Los resultados se presentan en la **Tabla 20** Resumen anchos, ríos de Colombia:

Tabla 20 Resumen anchos, ríos de Colombia

Río	Medida 1 (m)	Medida 2 (m)
Amazonas	3780	2400
Atrato	723	699
Caquetá	786	858
Cauca	647	697
Guaviare	1240	848
Magdalena	820	947
Meta	1140	921

Putumayo	1010	1100
Sinú	323	349
Vaupés	919	1300
Vichada	806	726

Fuente. El Autor

Con el fin de realizar la simplificación de las gráficas se trabajarán cruces con una longitud máxima de 1km.

4.5.3 Adaptación de gráficas de metodología

Se realizaron los ajustes respectivos a las gráficas en cuanto a diámetro y longitudes se refiere, adicionalmente se unificaron las gráficas de roca dura con blanda y arcilla dura con blanda.

Se presentan a continuación las gráficas para la metodología:

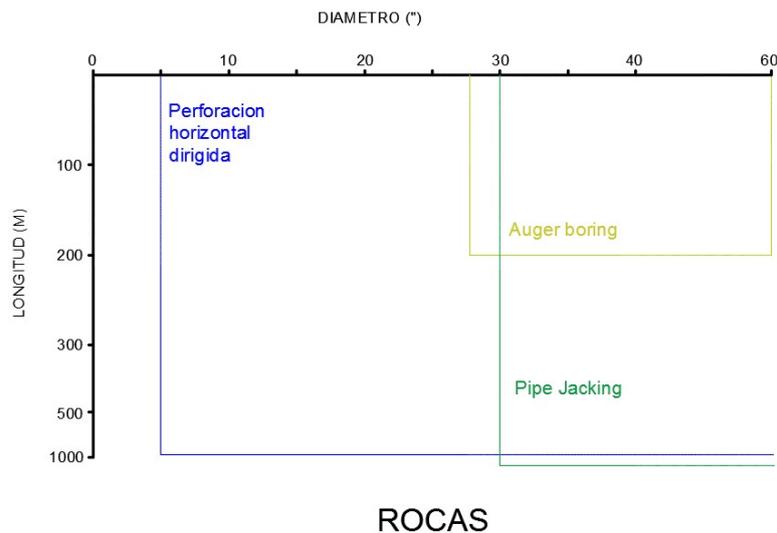


Figura 37 Gráfica final aplicabilidad de tecnologías sin zanja en rocas

Fuente. El Autor

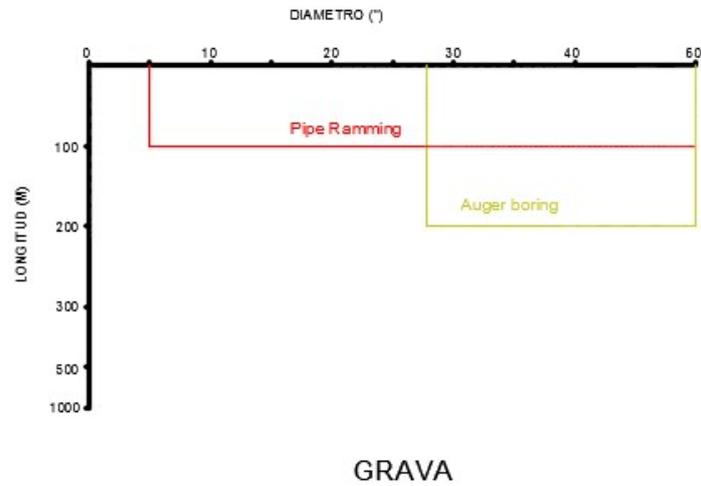


Figura 38 Gráfica final aplicabilidad de tecnologías sin zanja en grava Ramming
 Fuente. El Autor

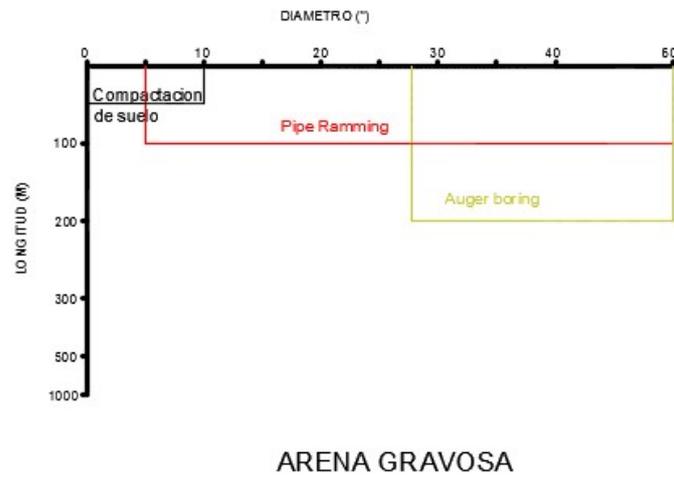
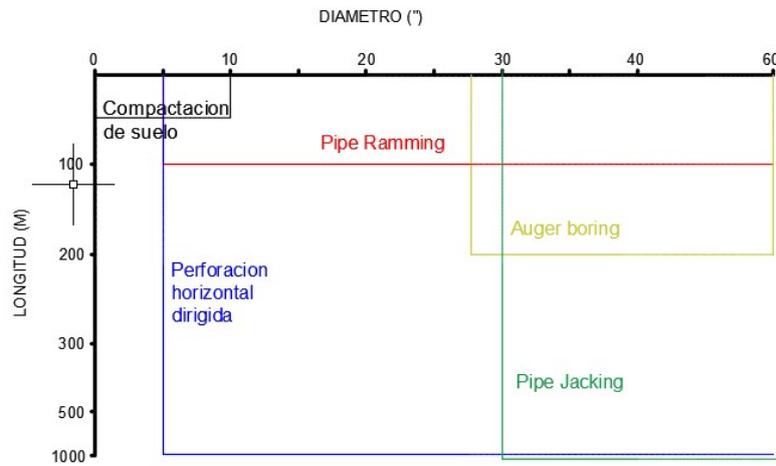
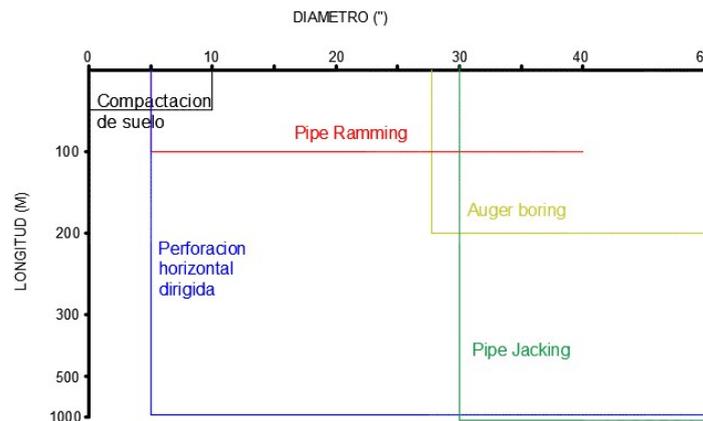


Figura 39 Gráfica final aplicabilidad de tecnologías sin zanja en arena gravosa
 Fuente. El Autor



ARENA POCO GRAVOSA

Figura 40 Gráfica final aplicabilidad de tecnologías sin zanja en arena poco gravosa
 Fuente. El Autor



ARCILLA

Figura 41 Gráfica final aplicabilidad de tecnologías sin zanja en arcilla
 Fuente. El Autor

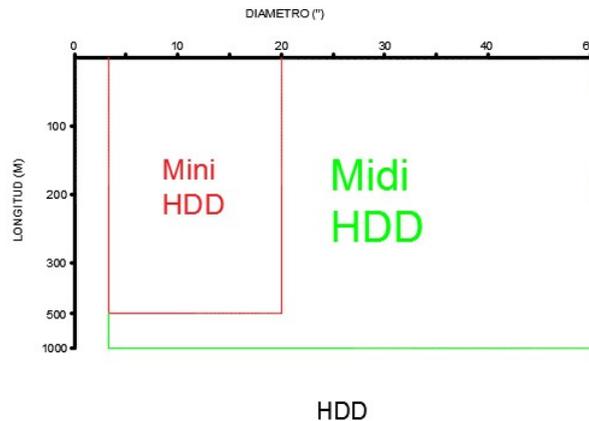


Figura 42 Gráfica final aplicabilidad de tecnologías sin zanja en HDD

Fuente. El Autor

Para las situaciones donde dos o más métodos sean aplicables se debe recurrir a otras condiciones, estas variables son dependientes de cada situación específica de obra y deben ser evaluadas una a una.

Por ejemplo, en el caso de un cruce donde apliquen más de una tecnología, es necesario evaluar otras condiciones de cada método. A continuación, se realiza dicha comparación luego de realizar el ajuste de las gráficas para los cruces subfluviales.

Adicionalmente cabe anotar que los casos donde no se presentan iguales diámetros y longitudes para un mismo tipo de suelo no fueron evaluados. Por ejemplo, Maxi HDD con Pipe Ramming.

4.6 Análisis de otras variables de decisión

Para las situaciones en donde 2 o más metodologías tengan aplicabilidad se puede llegar a una decisión revisando algunas otras de las variables de decisión. La priorización de una u otra de estas variables dependerá de la característica que la persona encargada de tomar la decisión considere más importante.

4.6.1 Efecto en el suelo circundante

En la **Tabla 21** se prioriza la elección de los métodos de compactación de suelo por encima de la perforación horizontal dirigida por la sencillez de ejecución el procedimiento, así como una menor área requerida de trabajo, lo que se traduce en mitigación de riesgos durante la ejecución de las actividades.

Adicionalmente se prioriza el uso del Pipe Ramming sobre el Auger Boring principalmente por el efecto causado durante la instalación de la tubería. Este efecto consiste en que a medida que el tubo es hincado dinámicamente en el suelo, en la punta de la tubería ocurre un efecto de compactación lo que claramente reorienta el suelo contra la pared de la tubería creando un “arco” alrededor de las paredes de la tubería. Esto genera que la presión vertical en el tubo se vea disminuida y exista mayor tensión en los lados de la tubería, alcanzando un estado estable. Adicionalmente el Pipe Ramming es una metodología más eficiente en cortas distancias, esto se debe principalmente a que no existe riesgo de atascamiento de la herramienta de excavación.

De lo anteriormente expuesto se presenta la siguiente tabla:

Tabla 21 Orden de elegibilidad según el efecto en el suelo circundante

CRUCES				ELEGIBILIDAD
Auger Boring	Pipe Jacking	PHD	Pipe Raming	PHD
Auger Boring	Pipe Jacking			Pipe Jacking
Auger Boring	Pipe Raming			Pipe Raming
Compactación de suelo	Pipe Raming			Compactación de suelo
Compactación de suelo	PHD			Compactación de suelo

Fuente. El Autor

4.6.2 Características del pozo de ataque

Para lograr ejecutar las metodologías en muchas ocasiones es necesario contar con amplios espacios de trabajos, la gran mayoría de las tecnologías sin zanja tienen como prerrequisito la ejecución de un pozo de ataque, las dimensiones de estos pozos de ataque dependen directamente del diámetro de la tubería y de la profundidad requerida de la instalación, por esta razón no se compararán las dimensiones de los pozos. Solo se compararán las características típicas de estos pozos de acuerdo con el tipo de tecnología a utilizar.

En las tecnologías en donde la potencia de empuje es suministrada desde el pozo de ataque es necesario la construcción de un muro de reacción en la cara opuesta del pozo a la perforación. Este muro debe ser lo suficientemente rígido para resistir la fuerza aplicada para la hincada de la tubería, la construcción de este tipo de muro supone una desventaja frente a las tecnologías que no lo requieren, estas desventajas incluyen y no se limitan a tiempo de ejecución y costos. El esquema del pozo se muestra en la **Figura 43** Pozo de ataque de una hincada de tubería

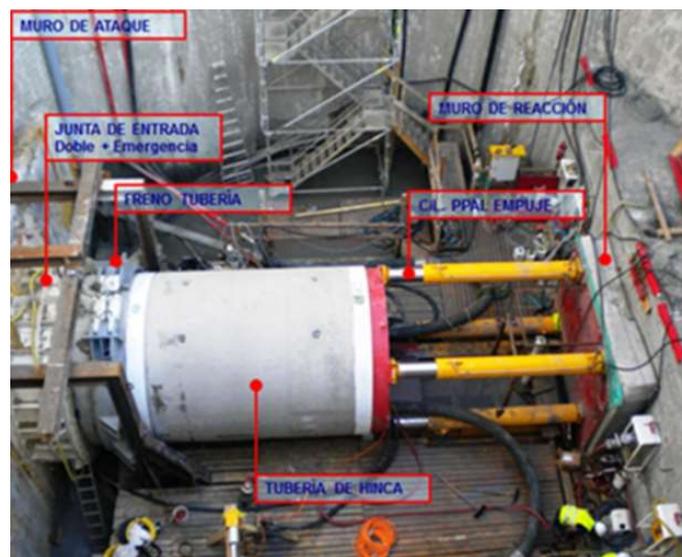


Figura 43 Pozo de ataque de una hincada de tubería
Fuente. Eurohinca

Las tecnologías de Auger Boring y Pipe Ramming requieren la construcción de un pozo, el cual debe tener un piso en concreto el cual tendrá la función de servir como soporte a los rieles en donde se ubica todo el sistema. El montaje de rieles en una losa no se considera tan complejo como la construcción de un muro de reacción.



Figura 44 Pozo de ataque Auger boring

Fuente. <http://www.bohrtec.com>

Para los métodos de compactación de suelo es necesario la excavación de un pozo de ataque, pero dado los diámetros pequeños que maneja este tipo de tecnología sumado a que la fuerza de la excavación es ejercida desde la punta, resulta en un pozo de ataque de bajas especificaciones. Prácticamente el único requerimiento es el de llegar a la cota de instalación de la tubería.

Por último nos encontramos con la perforación horizontal dirigida, la cual no requiere de la construcción de un pozo de ataque, adicionalmente es importante destacar que a mayor diámetro y profundidad, las dimensiones del pozo de ataque aumentan, esto añadido a la posible existencia de nivel freático que supone un diseño más exigente de dicho pozo de ataque mientras que el hecho de que la perforación horizontal dirigida no lo requiera presenta una ventaja abrumadora al momento de realizar un cruce subfluvial.

De lo anteriormente expuesto se presenta la **Tabla 22** Orden de elegibilidad según el espacio de trabajo necesario:

Tabla 22 Orden de elegibilidad según el espacio de trabajo necesario

Características del pozo de ataque	Orden De Elegibilidad	Tecnología
No requiere	1	Perforación horizontal dirigida
Pozo pequeño	2	Métodos de compactación de suelo
Pozo excavado con piso en concreto	3	Pipe Ramming
Pozo excavado con piso en concreto	4	Auger Boring
Pozo excavado con construcción de muro de reacción	5	Pipe Jacking

Fuente. El autor

Capítulo 5 Manual de selección de tecnología sin zanja para cruces subfluviales

A continuación, se enumera el paso a paso para la aplicación de la metodología

- Paso 1. Definición del diámetro de la tubería: lo establece el diseño hidráulico del proyecto, y se calcula en base al número de usuarios y a la dotación requerida.
- Paso 2. Definición de la longitud del cruce subfluvial: la determina el trazado final de la red del acueducto, definido por variables tales como la pendiente del resto del trazado y la dinámica fluvial del cuerpo de agua.
- Paso 3. Definición de la totalidad de tipos de suelos a atravesar a lo largo del trazado del cruce subfluvial: proviene de los sondeos realizados, que tienen que representar una suficiente muestra del trazado.
- Paso 4. Utilizando la gráfica correspondiente a cada uno de los tipos de suelo, se procede a ubicar la metodología adecuada. Ver **Figura 49** a **Figura 55**. Es de anotar que la metodología es adecuada si y solamente si permite ser usada a lo largo de todo el trazado. En caso de dificultades con algún estrato, se puede analizar la opción de profundizar el trazado, en caso que resulta más favorable.
- Paso 5. En caso de presentarse dos o más metodologías aplicables se procede a escoger la más adecuada teniendo en cuenta las tablas de orden de elegibilidad según el efecto del suelo circundante y espacio necesario. Ver **Tabla 21** y **Tabla 22**.

Nota: para determinar la profundidad mínima de instalación de la tubería, se toma como referencia de fondo del río un estrato que no sea constituido de sedimentos sueltos, y por supuesto el nivel al que eventualmente se va a dragar el río posteriormente. El chequeo que se debe realizar a partir de dicho nivel de referencia corresponde al chequeo por flotación:

$$U = \frac{\pi}{4} D^2 \delta_w$$

Ecuación 1. Cálculo de la presión hidrostática de empuje vertical

Fuente. <http://www.hidrojing.com/wp-content/uploads/2014/04/Flotacion-de-Tuberias.pdf>

En donde:

U = Empuje vertical por ml de tubo

D= Diámetro externo del tubo

δ_w = Peso unitario del agua

La altura mínima de recubrimiento requerido para resistir la flotación es calculada igualando la suma de las fuerzas verticales. Ver **Figura 45** Fuerzas que afectan la flotación.

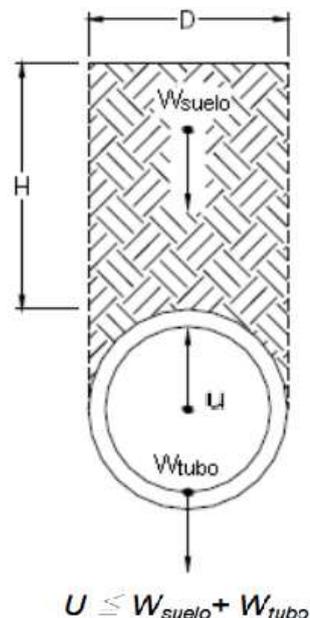


Figura 45 Fuerzas que afectan la flotación

Fuente. <http://www.hidrojing.com/wp-content/uploads/2014/04/Flotacion-de-Tuberias.pdf>

Cabe anotar que se podría analizar una carga prismática sobre la tubería, pero para efectos de realizar un cálculo conservador no se considera.

Capítulo 6 Aplicación de la metodología

6.1 Definición de un caso práctico de aplicación de la metodología

Para probar la metodología de selección de la técnica más viable para cruces subfluviales se realiza una búsqueda de proyectos en Colombia que incluyan dentro de sus actividades la construcción de cruces subfluviales para agua potable. Se escoge el caso de Puerto Boyacá presentado a continuación.

6.1.1 Problemática del caso de estudio

En Puerto Boyacá se cuenta con un servicio de abastecimiento de agua con una cobertura del 97%, en volúmenes de aproximadamente el 50% de lo que se requiere. Para dar solución a la problemática de abastecimiento de agua para el perímetro urbano, se necesita conocer y evaluar de manera técnica los medios por los cuales se pueda captar el agua como fuente directa de abastecimiento con la limitante de la no construcción de pozos profundos los cuales agotan los recursos a futuro y representan altos costos de mantenimiento.

Para lograr cumplir esta meta se pretende el mejoramiento del sistema de potabilización y la adquisición de nuevas fuentes de captación de agua, esto se logrará a través del proyecto del “sistema de captación, aducción, desarenación y conducción por gravedad de agua superficial para el casco urbano del municipio de Puerto Boyacá”.

6.1.2 Información de suelos

A continuación, se enuncian los datos de interés para el diseño del cruce subfluvial

6.1.2.1 Geología

El cruce subfluvial a realizar corresponde al río Magdalena a la altura de los municipios de Puerto Boyacá y Puerto Triunfo, el área del cruce forma parte del valle del Magdalena medio, estos suelos están formados por aluviones producto de las inundaciones periódicas, pendientes cercanas al 8 %, son suelos de mala permeabilidad, por el otro lado se encuentran terrazas cuaternarias con horizontes arenosos y gravillosos.

También se puede identificar la formación mesa, la cual está asociada a un afloramiento en el valle con horizontes de conglomerados, conformados por cantos rodados y guijarros cuarzosos redondeados contenidos en una matriz arcillo-arenosa de grano medio a fino.

En el área estudiada, se diferenció un solo tipo de depósitos aluviales que corresponden a un afloramiento proveniente de cuaternario, los cuales no se presentan como formaciones ni grupos sino se conocen como depósitos aluviales, cuyos componentes principales son arcillas, arenas y limos a mayor profundidad gravas, formando terrazas aluviales, la composición, textura y espesor de estos depósitos son muy variables, debido a sus diferencias en la fuente de aporte, dirección y distancia de acumulación. Ocurre una secuencia de sedimentos finos (limos rojos con esporádicos bloques embebidos por la formación Cuaternarios coluvial)

6.1.2.2 Estratigrafía

Se encuentran aluviones fluviolacustres que se caracterizan por la presencia a profundidad del cauce del río Magdalena, los cuales generan un depósito de gran escala de gravas y arenas de grano medio a grueso. Sobre estas arenas y gravas se encuentran capas de arcilla y limos junto con niveles de turbas; Tales capas se pudieron haber depositado durante un periodo de relativa quietud en la actividad del río, lo que indica la existencia de un ambiente de aguas tranquilas, propio de Ciénegas o lagunas.

Gran parte de este tipo de suelos constituidos por materiales limo arcillosos originados a partir de la decantación de los sedimentos por la condición de agua estática; por debajo de estos aparecen mantos de arena.

6.1.2.3 Estudio de suelos

Para efectos de este trabajo, nos centraremos principalmente en la investigación de suelo que se realizó.

En total se realizaron 6 diferentes perfiles los cuales corresponden al río Magdalena, estas perforaciones fueron realizadas tratando de conservar una línea recta atravesando por su ancho el río. Ver **Figura 46** Ubicación de las perforaciones realizadas.

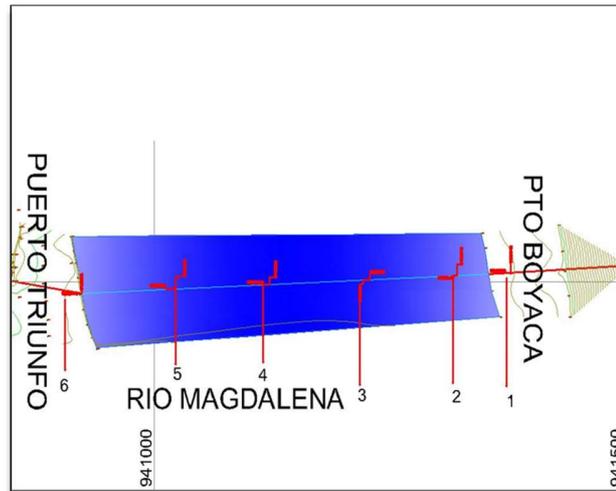


Figura 46 Ubicación de las perforaciones realizadas

Fuente. Estudio geomorfológico, geotécnico y de dinámica fluvial río Magdalena. Cajigas 2015

Los perfiles encontrados en dichas perforaciones se presentan en las siguientes tablas:

Tabla 23 Perfil de suelo No. 1 (acueducto alterno municipio de Puerto Boyacá)

PROF. m	SIMBOLO	DESCRIPCION DEL MATERIAL	wn. %	LIMITE S ATTERBERG			GRADACION			γ_t g/cc	RESISTENCIA kg/cm ²			
				L.L. %	L.P. %	LP. %	GRAVAS %	ARENAS %	FINOS %		R.P.I.	qu	N	
0.00		CAPA VEGETAL PASTO Y RAICES												
0.10			11.5							1.960	-	-	14	
		GRAVA ARCILLA HABANA GRISACEA CON VETAS ROJIZAS DE HUMEDAD MODERADA Y PLASTICIDAD BAJA DENSAS	13.4	34.7	20.0	14.7	58.5%	20.3%	21.2%	1.980	-	-	16	
11.00			12.2							1.992	-	-	20	
			15.1	N.L.	N.P.	-	16.9%	44.2%	38.9%	2.004	-	-	21	
		ARENA ARCILLA GRIS CLARO CON GRAVAS DE HUMEDAD Y PLASTICIDAD BAJA AUMENATANDO SU DENSIDAD	13.5							2.045	-	-	23	
			12.1							2.081	-	-	25	
			11.2	30.8	20.3	10.5	6.0%	58.1%	33.8%	2.113	-	-	29	
25.00		CONTINUA EL MISMO TIPO DE MATERIAL MUY DENSAS	10.3							2.160	-	-	32	

Fuente. Estudio geomorfológico, geotécnico y de dinámica fluvial Río Magdalena. Cajigas 2015.

Tabla 24 Perfil de suelo No. 2 (acueducto alterno municipio de Puerto Boyacá)

PERFIL DE SUELO No 2													
PROF. m	SIMBOLO	DESCRIPCION DEL MATERIAL	wn. %	LIMITES ATTERBERG			GRADACION			γ_t g/cc	RESISTENCIA kg/cm ²		
				L.L. %	L.P. %	I.P. %	GRAVAS %	ARENAS %	FINOS %		R.P.I.	qu	N
0.00 0.25		ARENAS Y LIMOS ARCILLOSOS COLO GRIS											
				40.8	93.6	48.9	44.7	0.0%	3.7%	96.3%	2.001	1.00	-
		LIMO ARCILLOSO CARMELITO DE HUMEDAD MODERADA Y PLASTICIDAD ALTA CONSISTENCIA FIRME	38.5							1.983	1.50	-	25
11.00		RECHAZO	37.2	88.9	46.1	42.7	0.0%	3.7%	96.3%	2.050	-	3.54	35
			36.2							2.033	2.25	3.60	75
16.00			35.1	83.9	81.6	2.3	29.9%	25.7%	44.4%	2.117	-	-	80
20.00		CONTINUA EL MISMO MATERIAL SE TORNA ROJIZA CON VETAS HABANAS CONSISTENCIA FIRME	34.2							2.122	3.00	-	95
25.00													

Fuente. Estudio geomorfológico, geotécnico y de dinámica fluvial río Magdalena. Cajigas 2015.

Tabla 25 Perfil de suelo No. 3 (acueducto alterno municipio de Puerto Boyacá)

PERFIL DE SUELO No 3																
PROF. m	CLASIFICACION		INDICE DE GRUPO	SIMBOLO	DESCRIPCION DEL MATERIAL	wn. %	LIMITES ATTERBERG			GRADACION			γ_t g/cc	RESISTENCIA kg/cm ²		
	USCS	AASHTO					L.L. %	L.P. %	I.P. %	GRAVAS %	ARENAS %	FINOS %		R.P.I.	qu	N
0,00 3,50	SC	A-2	2		ARENA GRUESA CON MH Y GRAVAS PEQUEÑAS											
						43,0	84,4	81,6	2,8	24,2%	30,1%	45,7%	2,033	1,25	1,90	16
	GC	A-2-5	40		PEQUEÑOS FRAGMENTOS DE ARCILLOLITAS LIMO ARCILLOSO CARMELITA DE HUMEDAD MODERADA Y PLASTICIDAD ALTA CONSISTENCIA FIRME	35,5							2,105	-	-	25
11,00						34,7	70,1	38,0	32,0	0,0%	2,1%	97,9%	2,122	2,50	2,64	33
	GW	A-1-6	2		RECHAZO GRAVAS Y PIEDRAS BIEN GRADAS(RECHAZO)	26,5							2,085	3,25	-	65
14,00						25,8	73,4	70,6	2,8	30,2%	24,6%	45,1%	3,021	>4,0	-	75
					CONTINUA EL MISMO MATERIAL SE TORNA AMARILLO CON VETAS GRISES CONSISTENCIA MUY FIRME PEÑA AMARILLA	23,3							4,032	-	R	95
25,00																

Fuente. Estudio geomorfológico, geotécnico y de dinámica fluvial Río Magdalena. Cajigas 2015.

Tabla 26 Perfil de suelo No. 4 (acueducto alternativo municipio de Puerto Boyacá)

PERFIL DE SUELO No 4																	
PROF. m	CLASIFICACION		INDICE DE GRUPO	SIMBOLO	DESCRIPCION DEL MATERIAL	wn. %	LIMITES ATTERBERG			GRADACION			γ_t g/cc	RESISTENCIA kg/cm ²			
	USCS	AASHTO					L.L. %	L.P. %	I.P. %	GRAVAS %	ARENAS %	FINOS %		R.P.I.	qu	N	
0,00					LAMINA DE AGUA												
0,20																	
0,50					MANTO DE GRASAS	30,2	72,4	30,9	41,5	0,0%	4,0%	95,7%	1,997	1,75	1,90	16	
					FRAGMENTOS DE LIMOLITAS												
	CL-ML	A-7-5	47		LIMOSA GRIS OSCURO CON VETAS NEGRAS CLARAS DE HUMEDAD MODERADA Y PLASTICIDAD ALTA	24,3						2,024	2,75	-	45		
					CONSISTENCIA FIRME												
12,00						21,3	70,2	70,0	3,2	45,6%	5,0%	49,4%	2,086	>4,5	3,50	65	
23,00	GS	A-1	3		FRAGMENTOS DE LIMOLITAS EN MARIZ LIMOSA												
					LIMO ARCILLOSO GRIS CON VETAS AMARILLAS DE HUMEDAD MODERADA Y PLASTICIDAD ALTA	23,5	71,4	69,6	1,7	44,3%	12,2%	42,9%	2,107	-	3,90	35	
25,00	GS	A-1-3	1		CONSISTENCIA MUY FIRME	22,1						2,119	-	-	5		

Fuente. Estudio geomorfológico, geotécnico y de dinámica fluvial Río Magdalena. Cajigas 2015.

Tabla 27 Perfil de suelo No. 5 (acueducto alternativo municipio de Puerto Boyacá)

PERFIL DE SUELO No 5																	
PROF. m	CLASIFICACION		INDICE DE GRUPO	SIMBOLO	DESCRIPCION DEL MATERIAL	wn. %	LIMITES ATTERBERG			GRADACION			γ_t g/cc	RESISTENCIA kg/cm ²			
	USCS	AASHTO					L.L. %	L.P. %	I.P. %	GRAVAS %	ARENAS %	FINOS %		R.P.I.	qu	N	
0,00					LAMINA DE AGUA												
2,50																	
	CL-ML	A-2-7	0		FRAGMENTOS DE LUTITAS												
					LIMO ARENOSO HABANO CON VETAS GRISES DE HUMEDAD MODERADA Y PLASTICIDAD ALTA	49,0	76,9	70,9	6,0	67,1%	19,1%	13,8%	2,003	1,50	-	12	
					CONSISTENCIA FIRME												
11,00						46,5						1,996	-	-	25		
					FRAGMENTOS DE ROCA EN MATRIZ LIMOSA												
	GM	A-2-7	0		GRAVA LIMOSA HABANA CON VETAS ROJIZAS DE HUMEDAD MODERADA Y PLASTICIDAD ALTA	47,1	68,9	39,1	29,9	50,9%	26,7%	22,4%	2,110	3,50	-	33	
					CONSISTENCIA FIRME												
14,00																	
					FRAGMENTOS DE LIMOLITAS GRAVAS												
	GS	A-1-3	0		LIMO ARENOSO HABANO CON VETAS AMARILLAS DE HUMEDAD MODERADA Y PLASTICIDAD ALTA	49,8	72,2	68,3	3,9	48,5%	33,8%	17,7%	2,083	>4,0	-	85	
					CONSISTENCIA MUY FIRME												
25,00					RECHAZO GRAVAS BIEN GRADADAS	38,5						2,107	-	R	98		

Fuente. Estudio geomorfológico, geotécnico y de dinámica fluvial Río Magdalena. Cajigas 2015.

Tabla 28 Perfil de suelo No. 6 (acueducto alternativo municipio de Puerto Boyacá)

PERFIL DE SUELO No 6													
PROF. m	SIMBOLO	DESCRIPCION DEL MATERIAL	wn. %	LIMITES ATTERBERG			GRADACION			γ_t g/cc	RESISTENCIA kg/cm ²		
				L.L. %	L.P. %	I.P. %	GRAVAS %	ARENAS %	FINOS %		R.P.I.	qu	N
0.00		CAPA VEGETAL PASTO Y RAICES											
0.25		FRAGMENTOS DE LIMOLITAS	48.6	58.6	28.1	30.5	2.0%	6.0%	92.0%	1.983	1.50	-	11
		ARCILLA LIMOSA AMARILLA CON VETAS GRIS											
		DE HUMEDAD MODERADA Y PLASTICIDAD ALTA											
		CONSISTENCIA FIRME	37.7							2.011	-	-	15
		CON LA PROFUNDIDAD SE TORNA HABANA CON VETAS GRISES CON FRAGMENTOS DE LIMOLITAS	35.5	56.6	27.0	29.6	5.0%	14.5%	80.5%	2.126	2.75	1.72	-
			32.6	54.9	52.7	2.2	88.7%	10.2%	1.1%	2.022	>4,0	-	46
		CONTINUA EL MISMO MATERIAL											
25.00		CONSISTENCIA MUY FIRME	30.5							2.116	-	-	59

Fuente. Estudio geomorfológico, geotécnico y de dinámica fluvial río Magdalena. Cajigas 2015.

6.1.3 Longitud del cruce subfluvial

El tramo de la conducción que corresponde al cruce subfluvial, tiene una longitud de 460 m sobre el Río Magdalena y está ubicado en el desde el tramo 35+660 al 36+120, la planta del trazado se muestra en la **Figura 47**:

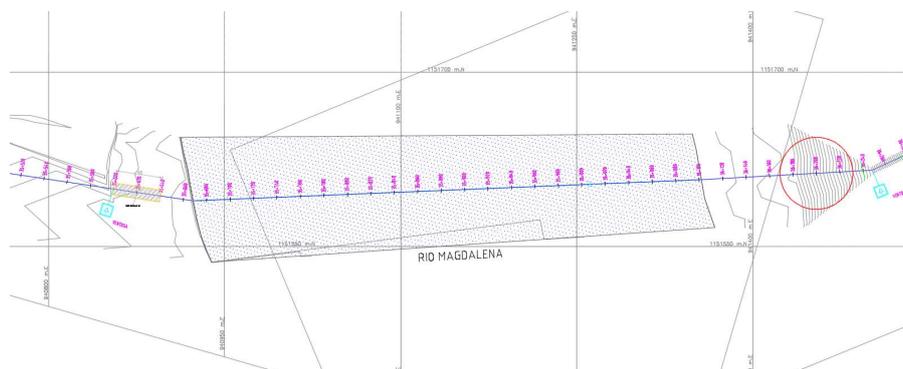


Figura 47 Planta del cruce subfluvial proyecto acueducto alternativo puerto Boyacá
Fuente. Alcaldía de puerto Boyacá

6.1.4 Diámetro de la conducción

Según los cálculos realizados por el diseñador del acueducto el diámetro de la tubería corresponde a 28”.

6.2 Aplicación del manual al caso practico

Paso 1. Definición del diámetro de la tubería: Diámetro de la tubería 28”. Ver **Capítulo 6.1.4.**

Paso 2. Definición de la longitud del cruce subfluvial: Longitud del cruce subfluvial 460 m. Ver **Capítulo 6.1.3.**

Paso 3. Definición de la totalidad de tipos de suelos a atravesar a lo largo del trazado del cruce subfluvial: La estimación de los tipos de suelos se realiza revisando los perfiles a la profundidad recomendada en el estudio de suelos, 12m, y buscando cual es la condición más desfavorable del trazado. Para esto se utilizan los datos obtenidos en las perforaciones que hacen parte del cruce subfluvial, es decir tomamos las perforaciones 2,3,4 y 5, omitimos la 1 y 6 que corresponden a las orillas y que, de ser necesario, pueden ser excavadas con facilidad. En la **Tabla 29** se resumen los porcentajes de gravas de cada perforación a la profundidad de 12m.

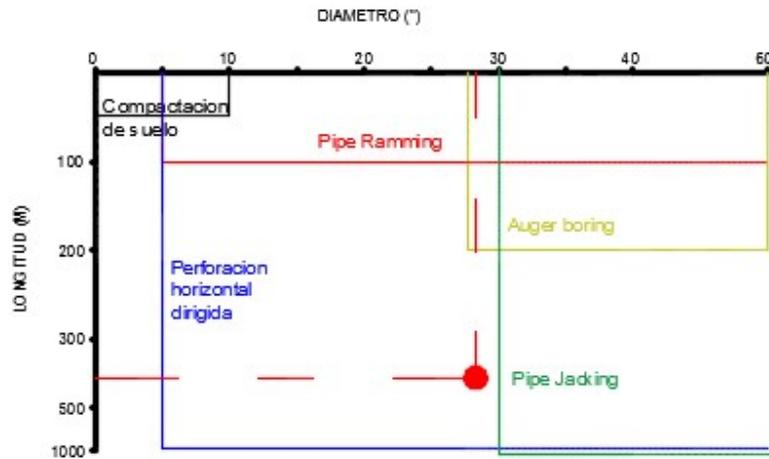
Tabla 29 Estimación del porcentaje de gravas según perforación

ID Perforación	% Gravas
2	0 %
3	0 %
4	45 %
5	50.9 %

Fuente. El autor

Como porcentaje de gravas tomamos el mayor valor que corresponde al 50.9 %, esto con el fin de tomar la situación más desfavorable de todo el trayecto.

Paso 4. Utilizando la gráfica correspondiente al porcentaje de gravas obtenido se procede a ubicar la metodología adecuada: Para realizar la estimación tomamos la figura correspondiente al porcentaje de gravas obtenido y proseguimos a ubicar la metodología.



ARENA POCO GRAVOSA

Figura 48 Obtención de la metodología
Fuente. El autor

Para el presente caso, la metodología más eficiente será la perforación Horizontal dirigida, donde no se presentan cruces con otras metodologías, por lo tanto no se requiere desempate, no obstante se debe definir si se debe utilizar un equipo de mini HDD o de midi HDD, para tal efecto nos apoyamos en la **Figura 42**.

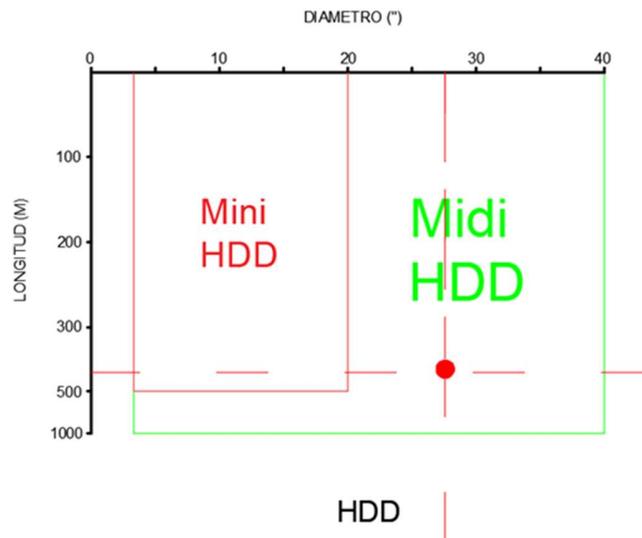


Figura 49 Obtención del tamaño del equipo
Fuente. El autor

En este caso el tamaño del equipo corresponde a un Midi HDD.

CONCLUSIONES

Se tenía el objetivo específico inicial de consolidar algunos perfiles típicos de suelo, para los ríos de Colombia y así unificar un criterio de selección para cada perfil de suelo típico. Para poder establecer una estructura general de trabajo se inició con un río representativo de Colombia como lo es el Río Magdalena, pero desafortunadamente nos encontramos con que, a lo largo, se encuentra gran variedad de formaciones geológicas, lo que hace muy difícil establecer estos perfiles, y si eso pasa a lo largo del mismo río, la complejidad al momento de revisarlos todos es mucho mayor. Por lo tanto, se considera que no es posible realizar dichos perfiles típicos y cada caso debe ser estudiado particularmente.

Dentro del estudio de las diferentes tecnologías sin zanja, se pueden exaltar ventajas que todas tienen en común: Si las comparamos con el método tradicional de zanja abierta, estas están relacionadas con la mínima afectación a los cauces de los ríos, disminuyendo así el impacto ecológico de este tipo de proyectos, y los buenos rendimientos que tienen estas metodologías en cuanto a tiempos de ejecución y recursos económicos.

Con el fin de poder enfocar un problema de cruce subfluvial hacia una técnica específica se desarrollaron una serie de gráficas adaptadas a las condiciones particulares de los ríos. No obstante, en el Anexo 1 se presentan las gráficas de aplicabilidad completa las cuales pueden ser consultadas para casos distintos a los subfluviales, ya sea autopistas, ciudades, montañas, parques naturales, etc.

Estas gráficas se enfocaron a tres restricciones específicas para cruces subfluviales. Lo anterior no quiere decir que no se puedan crear restricciones diferentes o que las demás limitantes no sean importantes. Una posible profundización de este trabajo puede ser analizar más limitantes o tratar de combinar más variables en otro tipo de gráficas.

Como comentario final, se recomienda fortalecer y desarrollar el conocimiento académico en esas tecnologías, puesto que para algunos proyectos aún no las consideran, con el argumento, hoy en día falso, de que la implementación en el país aún está muy reciente y se trata de equipos que se van desarrollando en los países de primer mundo. Para lograr un avance en la implementación de las tecnologías sin zanja en el país, también se sugiere regular la utilización de estas tecnologías ya que no existen normas ni en las leyes ni en la gran mayoría de entidades contratantes.

BIBLIOGRAFÍA

Abdollahipour, S., Jeong, D., Burman, R., and Gunsaulis, F. (2012). Performance Assessment of On-Grade Horizontal Directional Drilling. *Journal of Construction Engineering and Management*, Volume 138, No. 3, pp. 458–468.

Allouche, E., Ariaratnam, S., and Lueke, J. (2000). Horizontal Directional Drilling: Profile of an Emerging Industry. *Journal of Construction Engineering and Management*, Volume 126, No. 1, pp. 68–76.

Ariaratnam, S. and Beljan, I. (2005). Postconstruction Evaluation of Horizontal Directional Drilling Installations. *Practice Periodical on Structural Design and Construction*, Volume 10, No.2, pp. 115-126.

Ariaratnam, S. T., and Allouche, E. N. (2000). Suggested practices for installations using horizontal directional drilling. *Practice Periodical on Structural Design and Construction*, Volume 5, No. 4, pp. 142-149.

Ariaratnam, S. T., and Proszek, J. (2006). Legal consequences of damages to underground facilities by horizontal directional drilling. *Journal of Professional Issues in Engineering Education and Practice*, Volume 132, No. 4, pp. 342-354.

Baik, H., Abraham, D. M., and Gokhale, S. (2003). A decision support system for horizontal directional drilling. *Tunnelling and Underground Space Technology*, Volume 18, No. 1, pp. 99-109.

Baumert, M. E., Allouche, E. N., and Moore, I. D. (2004). Experimental investigation of pull loads and borehole pressures during horizontal directional drilling installations. *Canadian Geotechnical Journal*, Volume 41, No. 4, pp. 672-685.

Bayer, H.J. (Editor) (2005). *HDD Practice Handbook*. Vulkan-Verlag, Essen, Germany
Cheng, E., and Polak, M. A. (2007). Theoretical model for calculating pulling loads for pipes in horizontal directional drilling. *Tunnelling and Underground Space Technology*, Volume 22, No. 5-6, pp. 633-643.

Cajigas. (2015). Estudio geomorfológico, geotécnico y de dinámica fluvial río Magdalena

Gierczak, M. (2014). The qualitative risk assessment of mini, midi and maxi horizontal directional drilling projects. *Tunnelling and Underground Space Technology*, Volume 44, pp. 148-156.

Hair, C.W. (1994). Site Investigations Requirements for Large Diameter HDD Projects. Bton Rouge, Louisiana, New Advances in Trenchless Technology.

IbSTT Asociación Ibérica de Tecnología SIN Zanja (2013). Manual de Tecnologías Sin Zanja.

Ineica 2015. Geotécnica avenida del río y Malecón,

Jaganathan, A. P., Shah, J. N., Allouche, E. N., Kieba, M., and Ziolkowski, C. J. (2011). Modeling of an obstacle detection sensor for horizontal directional drilling (HDD) operations. *Automation in Construction*, Volume 20, No. 8, pp. 1079-1086.

Herrenknecht. (2012). Hinca de tubos con tecnología de microtuneladoras

Li, S. (2013). Construction monitoring of a municipal gas pipeline during horizontal directional drilling. *Journal of Pipeline Systems Engineering and Practice*, Volume 4, No. 4, 04013005. Curso de Postgrado Especialista en Tecnologías SIN Zanja 2015 M7-2-pág.10

Liu, T., and Wang, B. (2014). Guidance method in HDD based on rotating magnetic field. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, Volume 52, No. 1, pp. 71-75.
López-Jimeno, C.,

Lobo, J. (1997a). Tecnología sin zanjas una solución para la instalación de tuberías subterráneas, sin excavación: estado de conocimiento usos y aplicaciones en Colombia. PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA.

López-Jimeno, E., Ramírez, A., and Toledo, J.M. (2000). Manual de sondeos. Tecnología de perforación, Madrid.

Lubrecht, M. D. (2012). Horizontal directional drilling: A green and sustainable technology for site remediation. *Environmental Science & Technology*, Volume 46, No. 5, pp. 2484-2489.

Lueke, J. S., and Ariaratnam, S. T. (2005). Surface heave mechanisms in horizontal directional drilling. *Journal of Construction Engineering and Management*, Volume 131, No. 5, pp. 540-547.

Lueke, J. S., and Ariaratnam, S. T. (2006). Numerical characterization of surface heave associated with horizontal directional drilling. *Tunnelling and Underground Space Technology*, Volume 21, No. 1, pp. 106-117.

Ma, B., and Najafi, M. (2008). Development and applications of trenchless technology in china. *Tunnelling and Underground Space Technology*, Volume 23, No. 4, pp. 476-480.

Pellicer, E., Yepes, V., Teixeira, J.C., Moura, H.P., and Catalá, J. (2014). *Construction Management*. Wiley Blackwell, 316 pp.

Pinzón Abaunza, J. A. (2010). evaluación y perspectivas de la utilización de tecnologías sin zanja en redes de alcantarillado de Bogotá. *pontificia universidad javeriana*

Polak, M.A., and Chu, D. (2005). Pulling loads for polyethylene pipes in horizontal directional drilling: Theoretical modeling and parametric study. *Journal of Infrastructure Systems*, Volume 11, No. 2, pp. 142-150.

Royal, A.C.D., Polak, M.A., Rogers, C.D.F, and Chapman, D.N. (2010). Pull-in force predictions for horizontal directional drilling. *Proceedings of the ICE - Geotechnical Engineering*, Volume 163, No. 4, pp. 197-208.

Slavin, L. (2010). Parametric Dependency and Trends of HDD Pull Loads. *Journal of Pipeline Systems Engineering and Practice*, Volume 1, No. 2, pp. 69–76.

Slavin, L. M., and Najafi, M. (2012). Effect of pipe stiffness on maxi-HDD pull loads. *Journal of Pipeline Systems Engineering and Practice*, Volume 3, No. 1, pp. 22-31.

Suarez, 2012. Diagnóstico de estabilidad de la estructura de contención del muelle sur de la refinería de Barrancabermeja.

Tighe, S., Knight, M., Papoutsis, D., Rodriguez, V., and Walker, C. (2002). User cost savings in eliminating pavement excavations through employing trenchless technologies. *Canadian Journal of Civil Engineering*, Volume 29, No. 5, pp. 751–761.

Viana Vidal, fredy. (2004a). TÉCNICAS DE CONSTRUCCIÓN FUNDAMENTADAS EN LA TECNOLOGÍA SIN ZANJAS. Universidad de San Carlos de Guatemala, Guatemala.

Viana Vidal, fredy. (2004b). TÉCNICAS DE CONSTRUCCIÓN FUNDAMENTADAS EN LA TECNOLOGÍA SIN ZANJAS. Universidad de San Carlos de Guatemala, Guatemala.

Viana Vidal, fredy. (2004c). TÉCNICAS DE CONSTRUCCIÓN FUNDAMENTADAS EN LA TECNOLOGÍA SIN ZANJAS. Universidad de San Carlos de Guatemala, Guatemala

Wang, X., and Sterling, R. L. (2007). Stability analysis of a borehole wall during horizontal directional drilling. *Tunnelling and Underground Space Technology*, Volume 22, No. 5-6, pp. 620-632.

Yang, C. J., Zhu, W. D., Zhang, W. H., Zhu, X. H., and Ren, G. X. (2014). Determination of pipe pullback loads in horizontal directional drilling using an advanced computational dynamic model. *Journal of engineering mechanics*, Volume 140, No. 8, 04014060.

Yepes, V. (2014). *Maquinaria para sondeos y perforaciones*. Apuntes de la Universitat Politècnica de València, Ref. 209. Valencia, 89 pp.

Yepes, V. (2015). *Coste, producción y mantenimiento de maquinaria para construcción*. Editorial Universitat Politècnica de València, 155 pp.

Yepes, V. (2015). *Aspectos generales de la perforación horizontal dirigida*. Curso de Postgrado Especialista en Tecnologías Sin Zanja, Ref. M7-2, 10 pp

Zayed, T., and Mahmoud, M. (2013). Data acquisition and factors impacting productivity of horizontal directional drilling (HDD). *Tunnelling and Underground Space Technology*, Volume 33, pp. 63-72.

Zayed, T., and Mahmoud, M. (2014). Neurofuzzy-based productivity prediction model for horizontal directional drilling. *Journal of Pipeline Systems Engineering and Practice*, Volume 5, No. 3, 04014004.

Zhu, X., Dong, L., and Tong, H. (2013). Failure analysis and solution studies on drill pipe thread gluing at the exit side of horizontal directional drilling. *Engineering Failure Analysis*, Volume 33, pp. 251-264.

BIBLIOGRAFIA Web

Americapink. (2016). Pipe Ramming. [online] Disponible en: http://america.pink/pipe-ramming_3522548.html [Accessed 27 May 2018]

Coppard. (2015). Moling equipment. [online] Disponible en: <https://www.coppard.co.uk/pages/quick-links/moling-equipment.php> Accessed 27 May 2018]

Geocoredrill. (2012). Reamer products. [online] Disponible en: <http://www.geocoredrill.com/es/HDD-Reamer-products.html> [Accessed 27 May 2018]

Geocoredrill. (2012). Pilot bit products. [online] Disponible en: <http://www.geocoredrill.com/es/HDD-Pilot-Bit-products.html> [Accessed 27 May 2018]

Microtunel (2016). Hincas tuberías. [online] Disponible en: <http://www.microtunel.com/es/la-hinca-de-tuberia/micro-epb> [Accessed 27 May 2018]

Microtunel (2016). Hince tubería hidroescudo. [online] Disponible en: <http://www.microtunel.com/es/la-hinca-de-tuberia/micro-hidroescudo> [Accessed 27 May 2018]

Perfocolingenieria (2015). Auger Boring. [online] Disponible en: <http://www.perfocolingenieria.com/auger-boring> [Accessed 27 May 2018]

Powrmole. (2017). Trust boring pd 7 [online] Disponible en: <http://powrmole.com/directional-trust-boring-pd7.html> [Accessed 27 May 2018]

Tecmeco. (2015). Perforación horizontal dirigida. [online] Disponible en: www.tecmeco.com/categoria/perforacion-horizontal-dirigida/?from=productos-ytecnologias&guide=MzE=[Accessed 27 May 2018]

Tecmeco. (2015). Topos neumáticos. [online] Disponible en: <http://www.tecmeco.com/categoria/topos-neumaticos/?from=productos-ytecnologias&guide=MzE=>[Accessed 27 May 2018]

Tecmeco. (2016). Catalogo 8. [online] Disponible en: <http://www.tecmeco.com/wp-content/uploads/2016/10/HDD-tools-catalog-8.pdf> [Accessed 27 May 2018]

Tttechnologies (2017). Pipe Ramming. [online] Disponible en: <http://www.tttechnologies.com/products/grundoram-pneumatic-pipe-ramming/> [Accessed 27 May 2018]